

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

РЕЗЕРВУАРЫ ШАРОВЫЕ СТАЛЬНЫЕ СВАРНЫЕ.
МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ

РД РТМ 26-01-111-78

С С С Р

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Резервуары шаровые стальные сварные.
Методы расчета на прочность.

Р Д Р Т М 26-01-III-78

Издание официальное

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник Всесоюзного промышленного объединения

И.Д. Григорьев

1978 г.

Группа 102

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Резервуары шаровые стальные сварные. РДРТМ 26-01-111-78

Методы расчета на прочность.

Введен впервые

Приказом по Всесоюзному промышленному объединению

от "3" августа 1978 г.

срок действия

с 01.01.1979 г.

до 01.01.1984 г.

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

Настоящий руководящий технический материал устанавливает методы расчета на прочность сферических резервуаров объемом 600 м³ и 2000 м³, 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, укрепленных связями.

Методы расчета применимы для резервуаров, изготавливаемых в соответствии с ~~ОСТ 26-291-79~~ ① ~~ОСТ 26-291-71~~ "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

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ

ПРИКАЗОМ

по Всесоюзному промышленному объединению

" 3 " августа 1978г. № 121

ИСПОЛНИТЕЛЬ

Е.Н.Самойленко

СОГЛАСОВАН

Управлением по котлонадзору и
подъемным сооружениям Государствен-
ного Комитета по надзору за безо-
пасным ведением работ в промыш-
ленности и горному надзору при
Совете Министров СССР (Госгортех-
надзором СССР)

Зам. начальника Управления

А.И.Мурачев

1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1. Основные условные обозначения.

- $D-2R$ - внутренний диаметр сферической оболочки; см;
- D_i - диаметр окружности, по которой установлены опоры, см;
- d_k - диаметр опорной колонны, см;
- d_r - диаметр поперечного сечения тяги, см;
- d - расчетный диаметр подкладного листа, см;
- S - толщина сферической оболочки, см;
- S_i - толщина подкладного листа, см;
- S_k - толщина стенки колонны, см;
- c - прибавка на коррозию, см;
- c_t - технологическая прибавка, см;
- b - ширина подкладного листа, см;
- b_l - длина подкладного листа, см;
- h - высота уровня жидкости в резервуаре, см;
- h_o - относительная высота уровня жидкости в резервуаре, определяемая по черт.2;
- $2\theta_o$ - угловой размер подкладного листа, рад;
- l_k - длина опорной колонны, см;
- n - количество опор;
- P - рабочее внутреннее или наружное давление, кгс/см²;
- P_p - расчетное давление в резервуаре, кгс/см²;
- P_o - 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 ;

- σ_1, σ_2 - меридиональные и кольцевые мембранные напряжения, кгс/см²;
- σ_{u1}, σ_{u2} - 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;
- σ_T - 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/см³;
- γ_m - удельный вес металла, кгс/см³;
- g - ускорение свободного падения, см/сек²;
- G_0 - собственный вес шарового резервуара, кгс;
- $G_{ж}$ - вес жидкого продукта, кгс;
- $G_{оп}$ - вес опорной конструкции резервуара, кгс;
- N_c - снеговая нагрузка, кгс;
- N_b - ветровая нагрузка, кгс;
- N - горизонтальная составляющая сейсмической нагрузки, кгс;
- N_T - сила, растягивающая тягу, кгс;
- $R_{оп}$ - реакция опоры от суммарной нагрузки, кгс;
- R_n - нормальная сосредоточенная составляющая опорной реакции, кгс;
- R_k - касательная составляющая опорной реакции, кгс;
- M - расчетный сосредоточенный изгибающий момент, действующий на оболочку в зоне опирания, кгс·см;

M_k - 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;

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

1.3. Коэффициенты прочности сварных соединений φ принимаются в соответствии с ~~ГОСТ 26-01-291-79~~ ^{ГОСТ 26-01-291-71} "Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования".

~~1.4. Поправочный коэффициент η при расчете шаровых резервуаров, в которых хранятся или образуются взрыво- или пожароопасные продукты или сильнодействующие ядовитые вещества, устанавливается в соответствии с ГОСТ 26-01-102-70 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Поправочные коэффициенты к нормативным допускаемым напряжениям".~~

~~1.4. Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям следует принимать равным единице. ①~~

1.5. Прибавки к расчетным толщинам конструктивных элементов устанавливает в соответствии с ~~ГОСТ 14249-73~~ ^{ГОСТ 14249-80} ④

1.6. Материалы для шаровых резервуаров и газгольдеров выбирают в соответствии с ~~ТУ 26-01-150-75 "Резервуары и газгольдеры шаровые"~~ ^{ТУ 26-01-150-80 "Резервуары шаровые"}. ④

1.7. 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

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 проверочный 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 гидротестирования. Расчет для режима гидротестирования проводят без учета снеговой и сейсмической нагрузки.

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

$$S = \frac{P \cdot D}{4 \sigma_{\text{дон}} - P_p} + c + c_1$$

б) допускаемое давление $P_{\text{дон}}$

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

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

2.3.1. Сферические оболочки, для которых выполняется условие

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

теряют устойчивость в области упругости и рассчитываются по следующим зависимостям:

а) исполнительная толщина стенки

$$S = \frac{R}{300} \sqrt{\frac{P_r}{10^6 E}} + c + c_1$$

При $P_r = 1 \text{ кгс/см}^2$ и $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$

$$S = 0,00236 R + c + c_1$$

б) допускаемое наружное давление

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

При $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$

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

2.3.2. Сферические оболочки, для которых выполняется условие

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

теряют устойчивость за пределами упругости и рассчитываются по следующим формулам

а) исполнительная толщина стенки

$$S = \frac{P_r R}{2 \sigma_{\text{доп}}} \beta' + c + c_1$$

где

коэффициент $\beta' = 0,5 + \sqrt{0,25 + 12 \frac{\sigma_r}{E} \cdot \frac{\sigma_{\text{доп}}}{P_r}}$;

б) допускаемое наружное давление

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

где

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

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

а) в формулах п.2.3.1.

$$n_{уст} = 2,6$$

б) в формулах п.2.3.2.

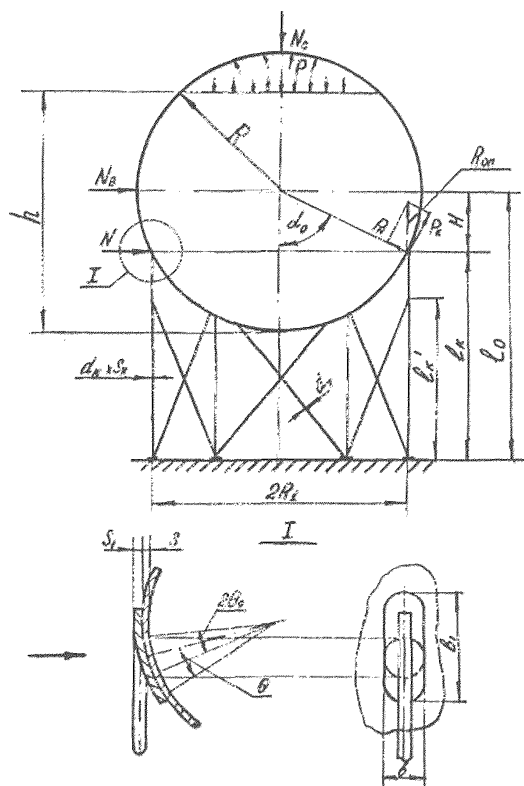
$$n_{уст} = 1,5 \cdot \beta'$$

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 оболочках, переходях и днищах"~~ ГОСТ 24755-81 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий." ④

2.5. Расчет шаровых резервуаров в местах опирания.

Расчетная схема резервуара.



черт. I

2.5.1. Определение нагрузок, действующих на резервуар.

2.5.1.1. Собственный вес сферы G_o

$$G_o = 4\pi R^2 \cdot S \cdot \gamma_n \cdot 1,05 = 4,2\pi R^2 \cdot S \cdot \gamma_n.$$

2.5.1.2. Вес опорной конструкции G_{on}

$$G_{on} = \gamma_n \cdot n [\pi (d_n - S_n) \cdot S_n \cdot l_n + 2\pi \frac{d_n^2}{4} \cdot l_n] = \\ = \pi n \cdot \gamma_n [(d_n - S_n) \cdot S_n \cdot l_n + 0,5 d_n^2 l_n].$$

2.5.1.3. Вес жидкого продукта G_k

$$G_k = 1,05 \gamma_k \cdot R^3 h_o^2 (3 - h_o).$$

2.5.1.4. Вертикальная составляющая снеговой нагрузки N_c определяется по формуле

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

где

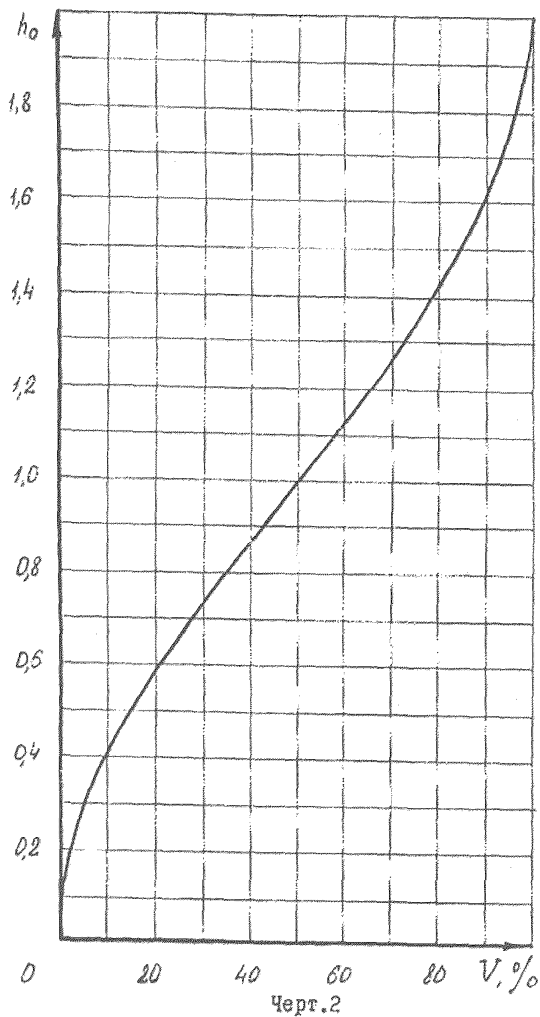
q_c - нормативная составляющая снеговой нагрузки в кгс/см²,
принимается по табл. I.

Таблица I

Районы СССР по СНИП П-6-74	I	II	III	IV	V	VI
Вес снегового покро- ва, q_c кгс/см ²	0,005	0,007	0,01	0,015	0,02	0,025

График заполнения сферы продуктом.

$h_0 = \frac{h}{D}$ - относительная высота заполнения;
 V - объем в %.



2.5.1.5. Расчет ветровой нагрузки N_6 , действующей на шаровой резервуар.

В расчет принимается проекция равнодействующей сил ветра в направлении горизонтального диаметра

$$N_6 = 1,05 \cdot D^2 \cdot q_6 \cdot \xi \cdot \beta_1$$

Здесь

q_6 - нормативный скоростной напор ветра в районе установки резервуара для высоты над поверхностью земли до 10 м, принимается по табл.2;

ξ - поправочный коэффициент на возрастание скоростного напора ветра для высот более 10 м, принимается по графику на черт.3;

$\beta_1 = 1 + 0,35 \cdot \delta$ - коэффициент увеличения скоростного напора по высоте;

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

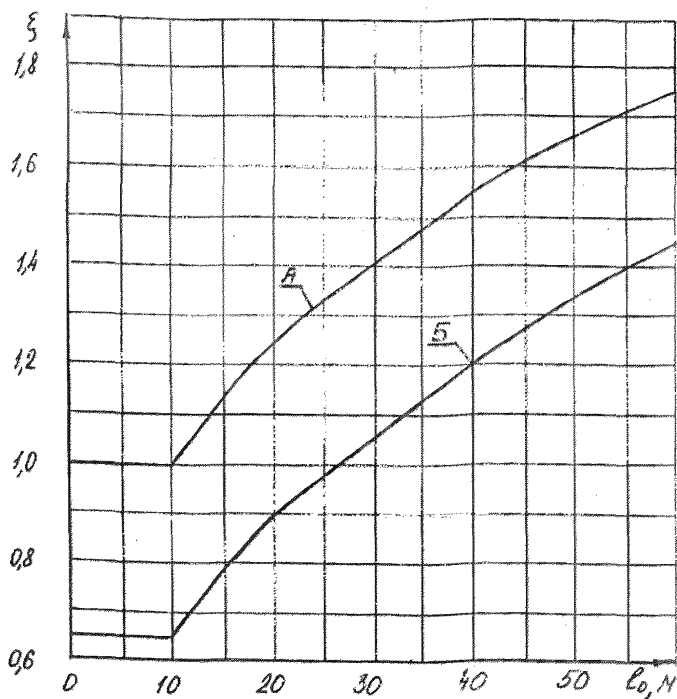
Таблица 2

Районы СССР по СНИП II-6-74	I	II	III	IV	V	VI	VI
Скоростной напор q_6 , кгс/см ²	0,0027	0,0035	0,0045	0,0055	0,0070	0,0085	0,01

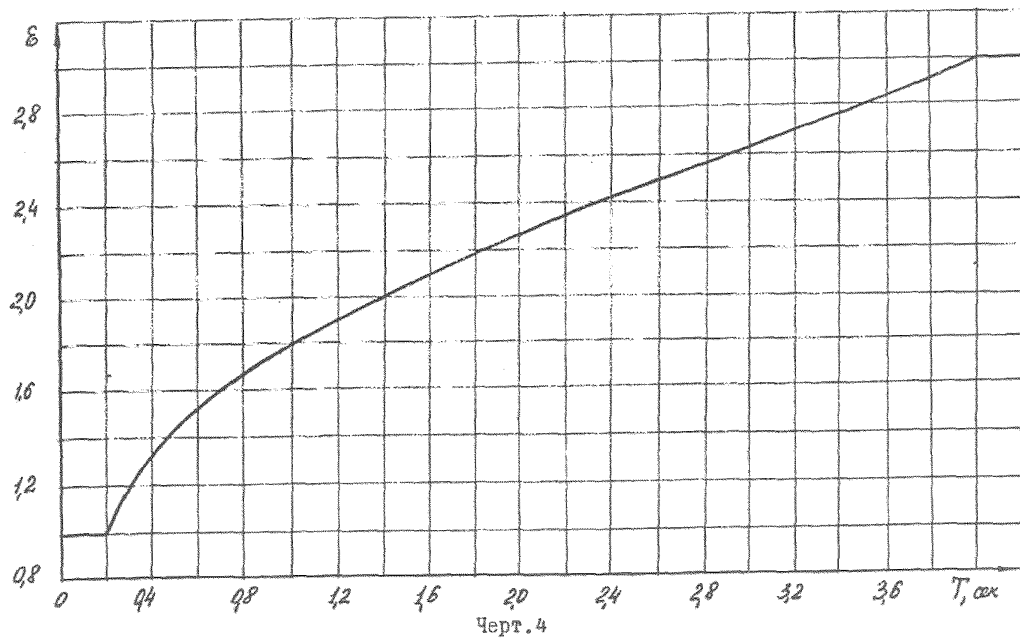
График коэффициента скоростного напора
ветра для высоты более 10 м от уровня земли.

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

Б - для местности, равномерно покрытой препят-
ствиями высотой более 10 м (города с окра-
инами, лесные массивы и т.д.)



Черт. 3

График коэффициента динамичности при действии ветровой нагрузки - ε 

2.5.1.6. Расчет сейсмической нагрузки, действующей на резервуар.

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

$$N = (G_k + \tilde{K}_1 G_k) \beta K_c$$

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	0,1

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

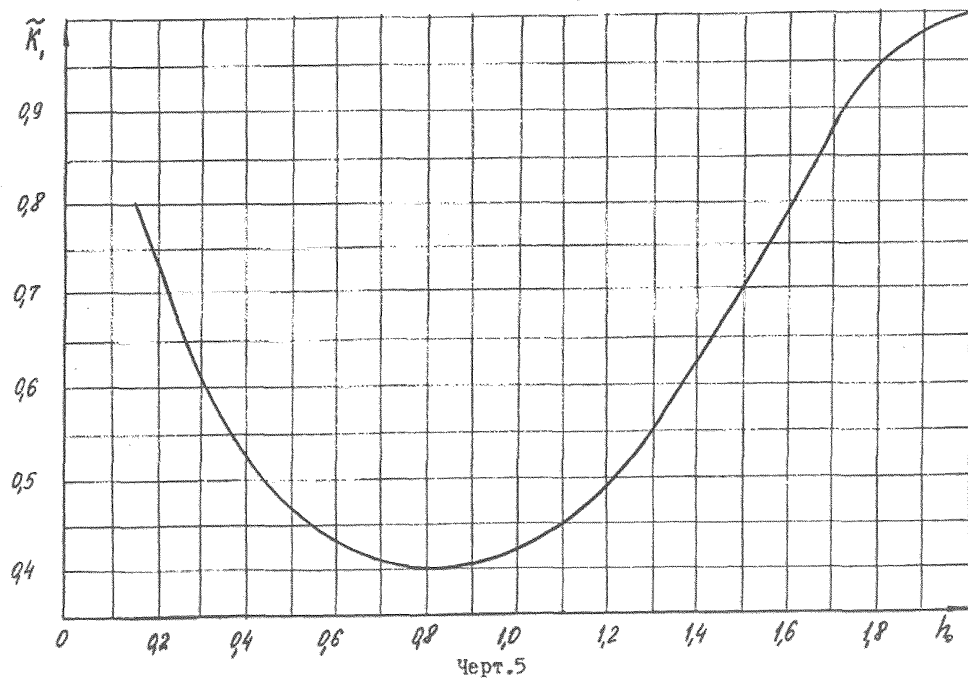
$$\beta = \beta_0 \tilde{K}_0,$$

где \tilde{K}_0 — коэффициент, принимаемый в зависимости от отношения $\frac{l_k}{d_k}$:

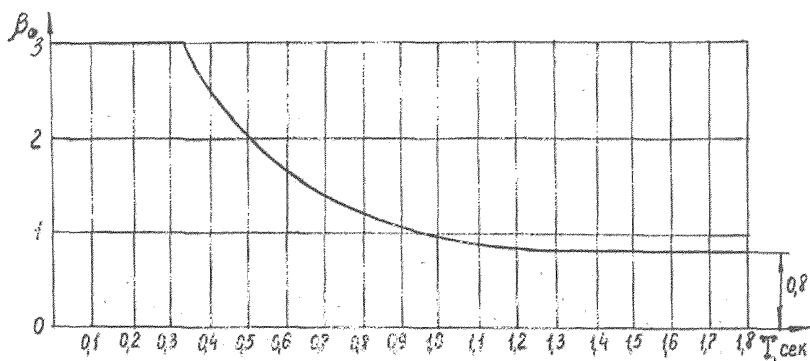
а) при $\frac{l_k}{d_k} \leq 15$ $\tilde{K}_0 = 1$,

б) при $\frac{l_k}{d_k} \geq 25$ $\tilde{K}_0 = 1,5$;

в) при $15 < \frac{l_k}{d_k} < 25$ $\tilde{K}_0 = 1 + 0,005 \left(\frac{l_k}{d_k} - 15 \right)$.

График коэффициента формы резервуара \tilde{K}_1 

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



Черт.6

Период собственных колебаний системы, определяется по формуле

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

Здесь

$$G_k = G_o + \frac{I}{2} G_{on} \quad - \text{вес резервуара } G_o \text{ с учетом половины веса опорной конструкции } G_{on}$$

$$G_k = 1,05 \gamma_k R^3 h_o^2 (3 - h_o) \quad - \text{вес жидкости, кгс.}$$

2.5.1.7. Жесткость конструкции определяется зависимостью

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

$$K_1 = \frac{12 E J_k}{l_k^3} \quad - \text{жесткость одной колонны, кгс/см.}$$

$$J_k = \frac{\pi}{64} [d_k^4 - (d_k - 2S_k)^4] \quad - \text{момент инерции поперечного сечения колонны, см}^4;$$

$$\text{При } \frac{d_k}{2S_k} \geq 10 \quad J_k = 0,393 d_k^3 S_k;$$

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

Здесь

$$F = 0,785 d_t^2 \quad - \text{площадь поперечного сечения троса, см}^2;$$

$$l_j = \sqrt{l_k'^2 + a_j^2} \quad - \text{длина троса, см.}$$

где l_k' — расстояние от центра тяжести резервуара до точки крепления троса, см.

Таблица 4

К определению жесткости опорной конструкции

Код-во опор	Схема опорной конструкции	Проекция тяжей на направ- ление движения $a_j, \cos \angle_j$	Суммарная жесткость тяжей, K_z
6		$a_1 = 0,5 \cdot R_1^*$ $a_2 = R$ $\cos \angle_1 = \frac{a_1}{l_1}$ $\cos \angle_2 = \frac{a_2}{l_2}$	$2EF \left[2 \frac{\cos^2 \angle_1}{l_1} + \frac{\cos^2 \angle_2}{l_2} \right]$ $l_j = \sqrt{a_j^2 + l_k'^2}$ $j = 1, 2$
8		$a_1 = 0,293 \cdot R_1$ $a_2 = 0,707 \cdot R_1$ $\cos \angle_1 = \frac{a_1}{l_1}$ $\cos \angle_2 = \frac{a_2}{l_2}$	$4EF \left[\frac{\cos^2 \angle_1}{l_1} + \frac{\cos^2 \angle_2}{l_2} \right]$ $l_j = \sqrt{a_j^2 + l_k'^2}$ $j = 1, 2, 3$
I2		$a_1 = 0,134 \cdot R_1$ $a_2 = 0,366 \cdot R_1$ $a_3 = 0,5 \cdot R_1$ $\cos \angle_j = \frac{a_j}{l_j}$	$4EF \left[\frac{\cos^2 \angle_1}{l_1} + \frac{\cos^2 \angle_2}{l_2} + \frac{\cos^2 \angle_3}{l_3} \right]$ $l_j = \sqrt{a_j^2 + l_k'^2} \quad j = 1, 2, 3$

* $R_1 = R \sin \angle_0$ - радиус окружности установки опор; \angle_0 - см. черт. I.
 При $\angle_0 = 90^\circ$ $R_1 = R$.

a_j - проекция ^{тяжы} на горизонтальную плоскость, см;
принимается по табл.4

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

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

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

2.5.2. Определение нагрузок в зоне опирания.

2.5.2.1. Максимальная опорная реакция определяется по формуле

$$R_{on} = \frac{G_0 + G_n + N_0}{n} + \frac{1}{R_1} \cdot \left[\frac{l_n \cdot K_1}{K^*} (N + N_0) + \frac{2H}{n} \cdot N_0 \right]$$

Здесь

$$H = R \cos \alpha_0 \quad \text{см, (черт. I)}$$

α_0 - центральный угол середины опоры, град, (черт. I);

2.5.2.2. Внутреннее давление среды в области опоры

$$p_0 = p + \gamma \cdot R (h_0 - 1 + \cos \alpha_0)$$

2.5.2.3. Сосредоточенная нормальная сила P_n

$$P_n = R_{on} \cdot \cos \alpha_0$$

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

$$M_{из} = R_{on} \cdot S^* \cdot \sin \alpha_0$$

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

2.5.2.5. Сосредоточенный изгибающий момент M_k , возникающий на концах колонны от действия горизонтальных сил N и N_b ,

$$M_k = 0,5 \frac{K_1}{K^*} (N_b + N) l_k.$$

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

$$M = M_{из} + M_k.$$

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

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

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

$$\sigma_1^*(M) = \frac{4DM}{\pi d^2 (S-c)};$$

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

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

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

Здесь

$d = b$ — ширина подкладного листа.

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

$$\sigma_1^* = \sigma_1^*(P_n) + \sigma_1^*(M) + \sigma_1^*(p_0)$$

$$\sigma_2^* = \sigma_2^*(P_n) + \sigma_2^*(M) + \sigma_2^*(p_0)$$

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 $p_0 = I$, $P_n = I$, $M = I$ определяется параметр $f(f_{p_n}, f_{p_0}, f_M)$ для сил T_1 , T_2 , и моментов M_1 , M_2 . В качестве d при определении параметров f от p_n и M принимается ширина подкладного листа b , а при определении параметра f от p_0 принимается половина длины подкладного листа $b/2$.

б) По таблице 5 в зависимости от величины полученных параметров f_{p_n} , f_{p_0} , f_M находят значения силовых факторов от каждого вида единичной нагрузки

$$T_1(f_{p_n}), T_2(f_{p_n}), M_1(f_{p_n}), M_2(f_{p_n}),$$

$$T_1(f_{p_0}), T_2(f_{p_0}), M_1(f_{p_0}), M_2(f_{p_0}),$$

$$T_1(f_M), T_2(f_M), M_1(f_M), M_2(f_M).$$

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

$$T_I (P_H) = P_H \cdot T_I (f_{P_H}),$$

$$T_I (M) = M \cdot T_I (f_M),$$

$$T_I (P_0) = P_0 \cdot T_I (f_{P_0}),$$

$$T_2 (P_H) = P_H \cdot T_2 (f_{P_H}),$$

$$T_2 (M) = M \cdot T_2 (f_M),$$

$$T_2 (P_0) = P_0 \cdot T_2 (f_{P_0}),$$

$$M_I (P_H) = P_H \cdot M_I (f_{P_H}),$$

$$M_I (M) = M \cdot M_I (f_M), \quad M_I (P_0) = P_0 \cdot M_I (f_{P_0}),$$

$$M_2 (P_H) = P_H \cdot M_2 (f_{P_H}),$$

$$M_2 (M) = M \cdot M_2 (f_M),$$

$$M_2 (P_0) = P_0 \cdot M_2 (f_{P_0}),$$

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

$$T_I = T_I (P_H) + T_I (M) + T_I (P_0),$$

$$T_2 = T_2 (P_H) + T_2 (M) + T_2 (P_0),$$

$$M_I = M_I (P_H) + M_I (M) + M_I (P_0),$$

$$M_2 = M_2 (P_H) + M_2 (M) + M_2 (P_0).$$

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

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_r} \right)^2 + \sigma_{из} \leq 1 \quad (2)$$

$$\sigma \leq \sigma_{доп}$$

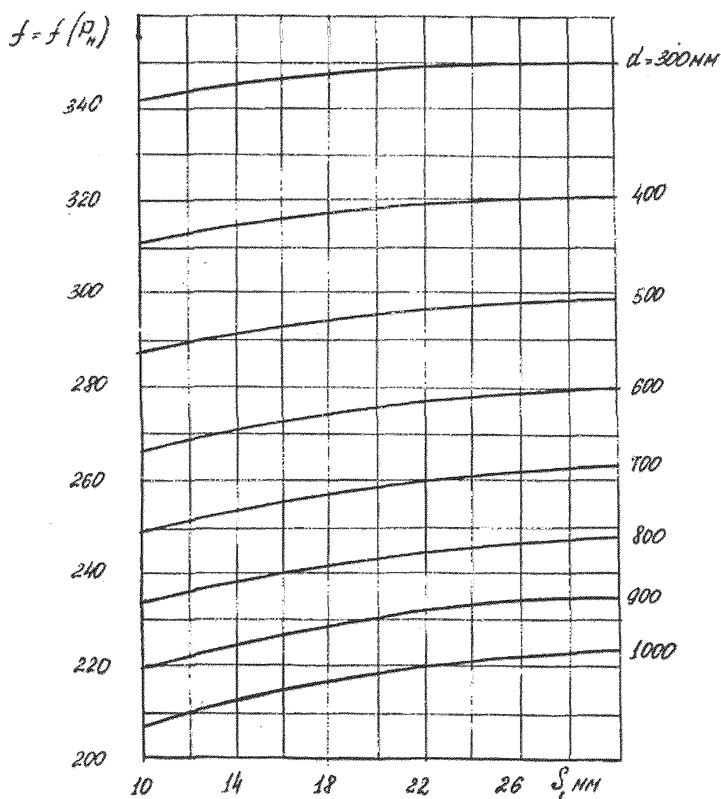
где $A = \begin{cases} 1 - \text{для рабочих условий;} \\ 0.2 - \text{для условий гидро-} \\ \text{испытания.} \end{cases}$

Здесь

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

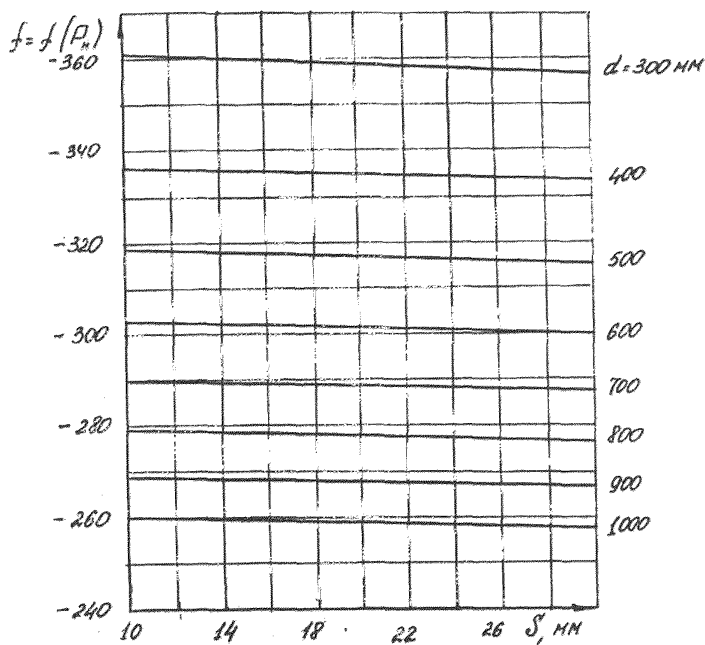
$$\sigma_{из} = \sqrt{\sigma_{из1}^2 + \sigma_{из2}^2 - \sigma_{из1} \cdot \sigma_{из2}} \quad - \text{эквивалентное изгибное напряжение.}$$

Величина параметра $f=f(p_n)$ для определения усилия T_I от нагрузки $P_n=I$ ($D=10500$ мм)



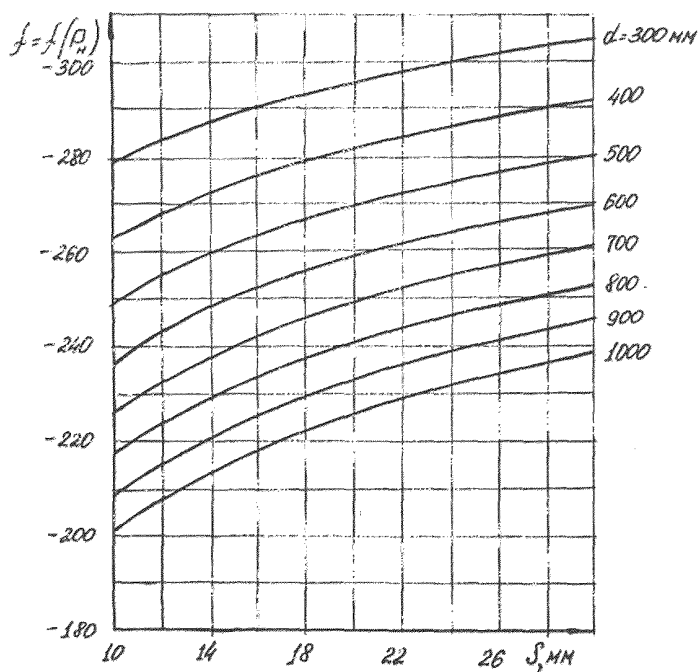
Черт. 7

Величина параметра $f=f(\rho_n)$ для определения усилия T_2 от нагрузки $P_n=I$ ($L=10500$ мм)



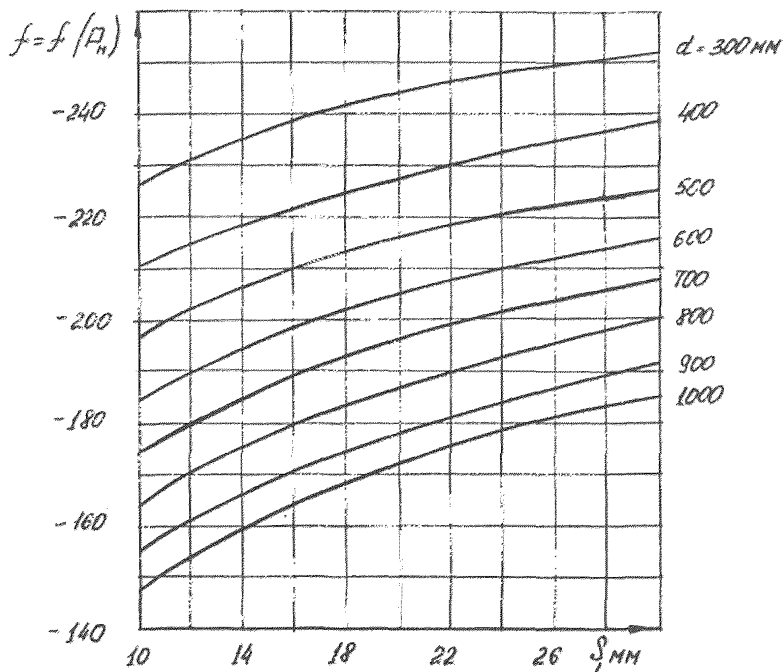
Черт. 8

Величина параметра $f=f(\rho_H)$ для определения момента M_I от нагрузки $P_H=I$ ($D=10500$ мм)



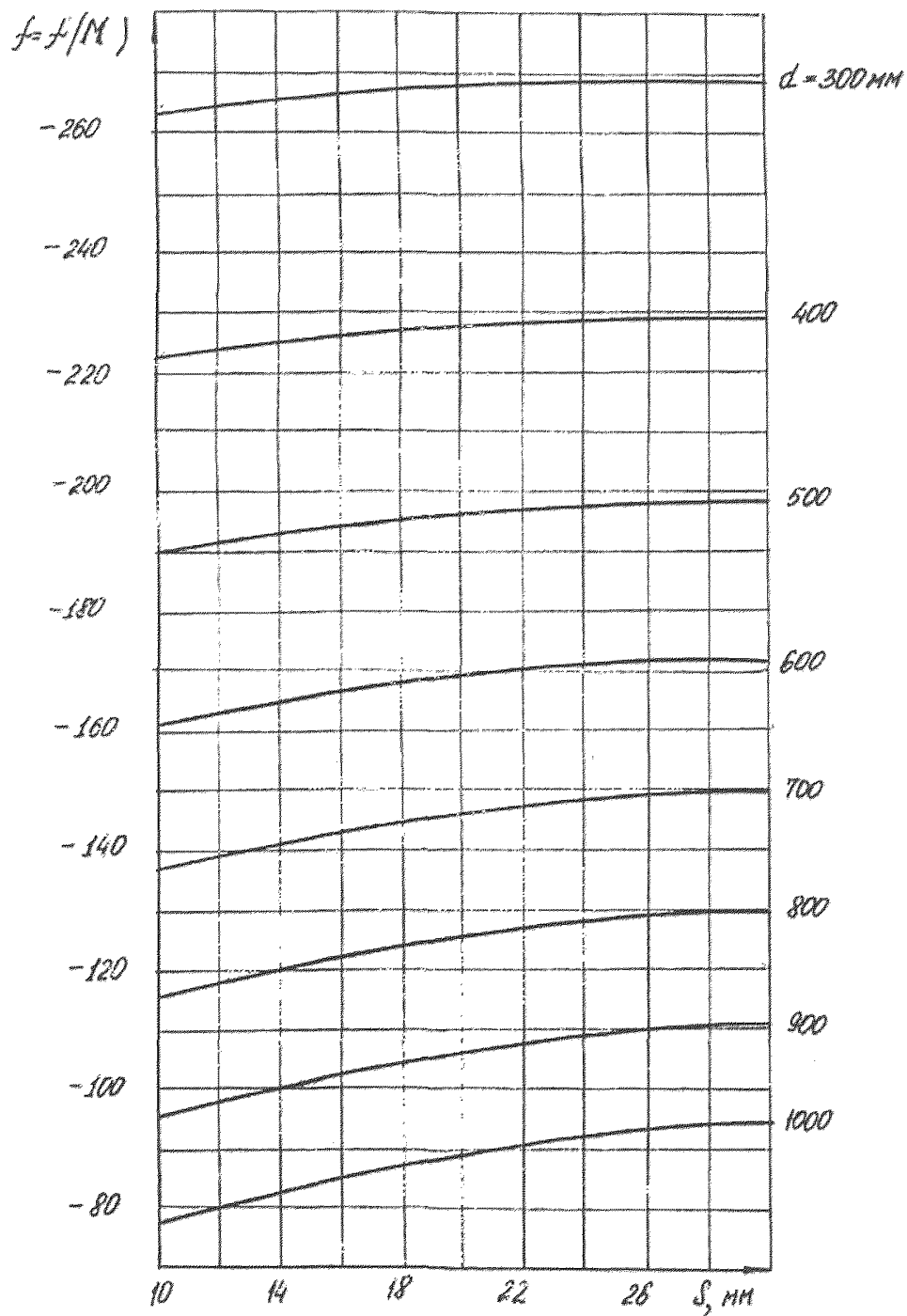
Черт. 9

Величина параметра $f=f(\rho_H)$ для определения кольцевого момента M_2 от нагрузки $P_H=1$
($L=10500$ мм)



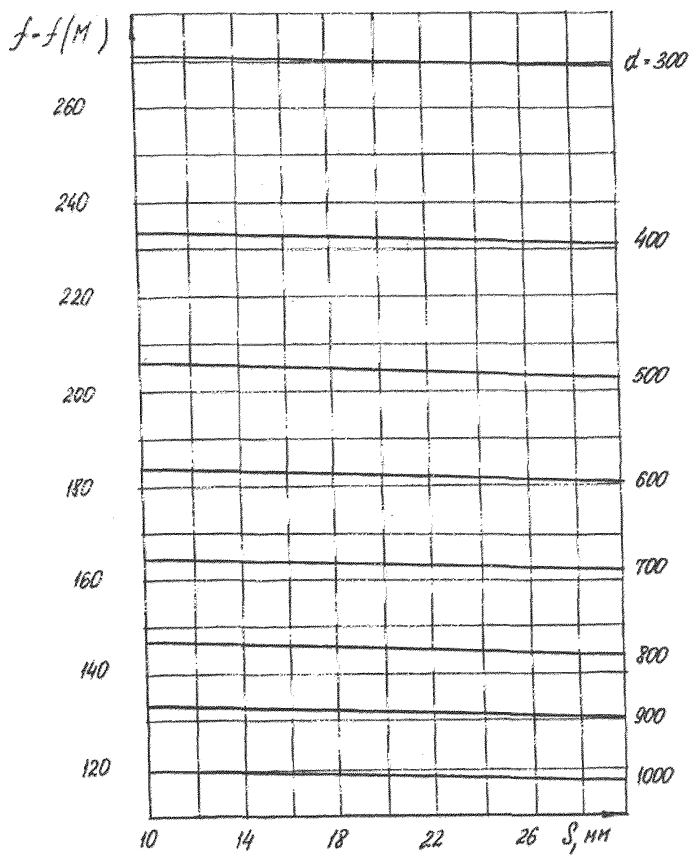
Черт. 10

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



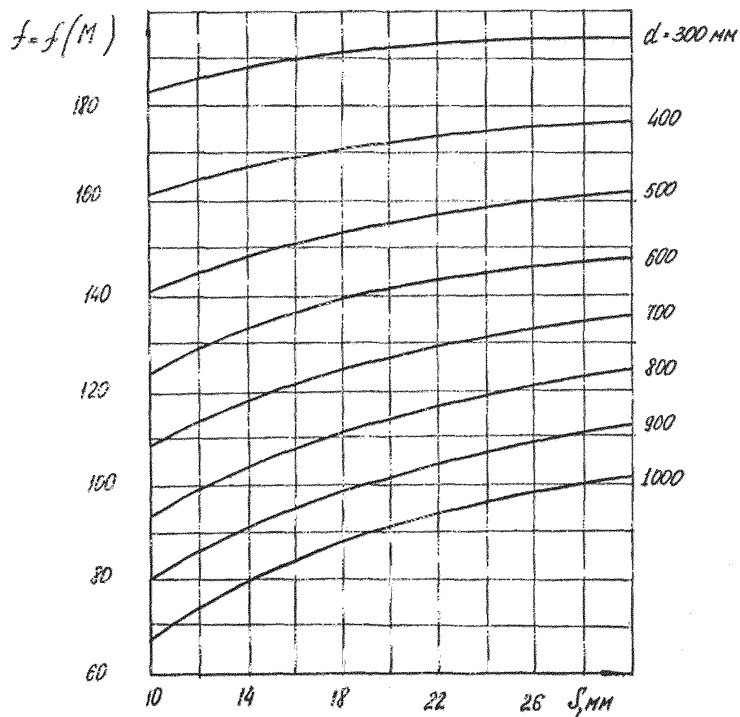
Черт. II

Величина параметра $f=f(M)$ для определения T_2 от нагрузки $M=I$ ($D=10500$ мм)



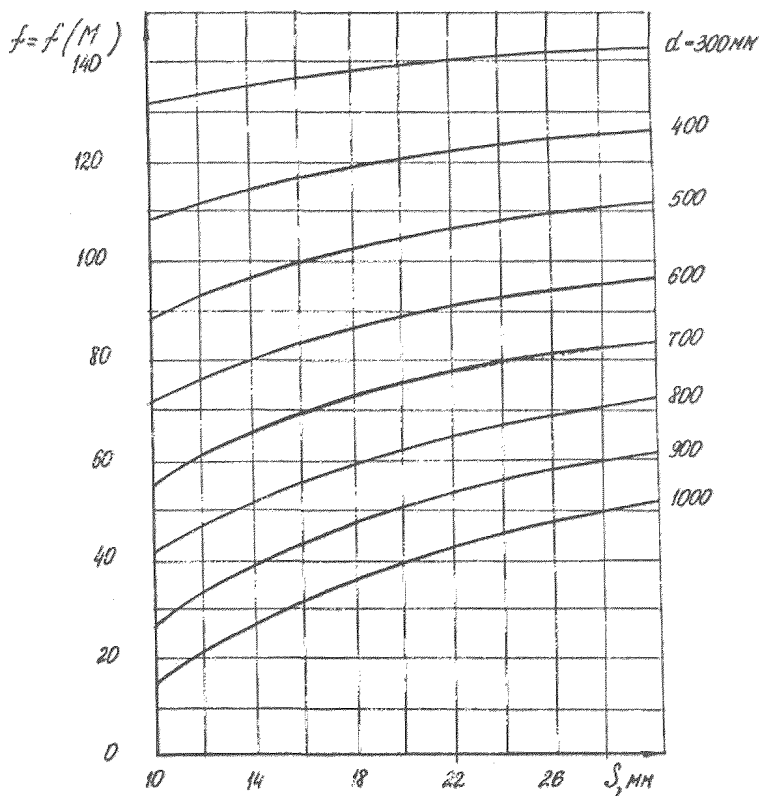
Черт. 12

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



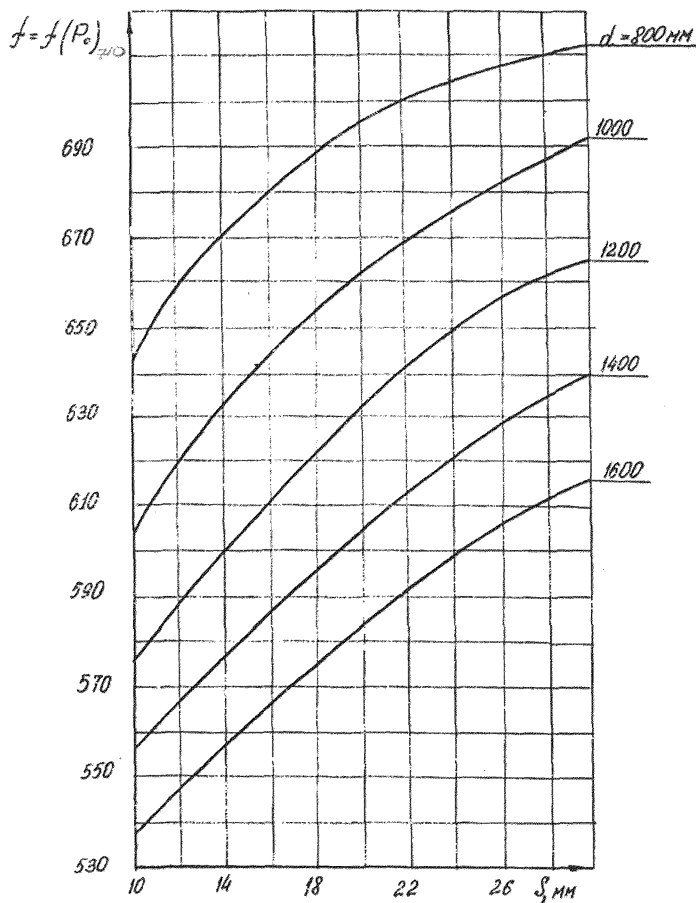
Черт. 13

Величина параметра $f=f(M)$ для определения кольцевого момента M_2 от нагрузки $M=I$
($D = 10500$ мм)



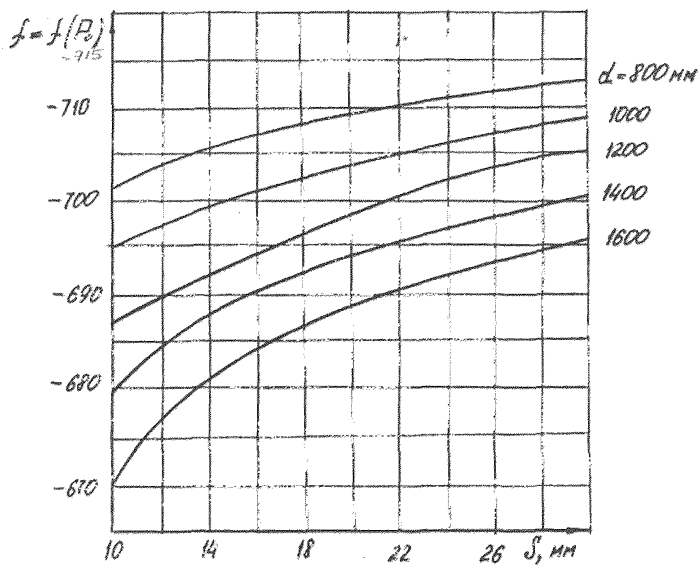
Черт. 14

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



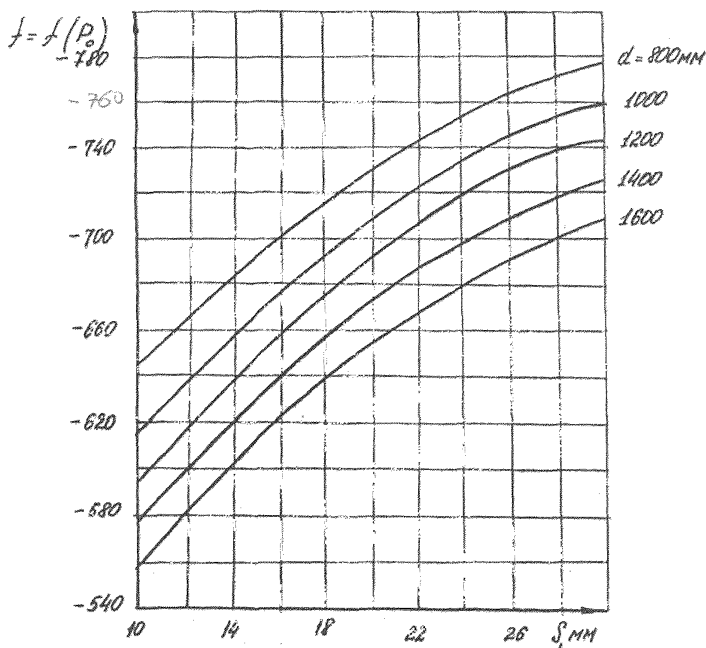
Черт. 15

Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения
кольцевого усилия T_2 от нагрузки $P_0=I$
($d = 10500$ мм)



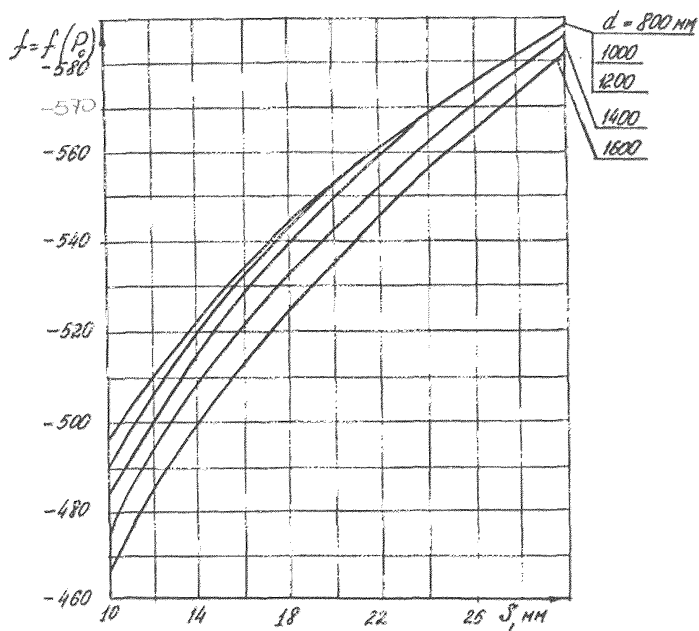
Черт. 16

Величина параметра $f = f(\rho_0)$ для определения
меридионального момента M_I от нагрузки $P_0 = I$
($L = 10500$ мм)



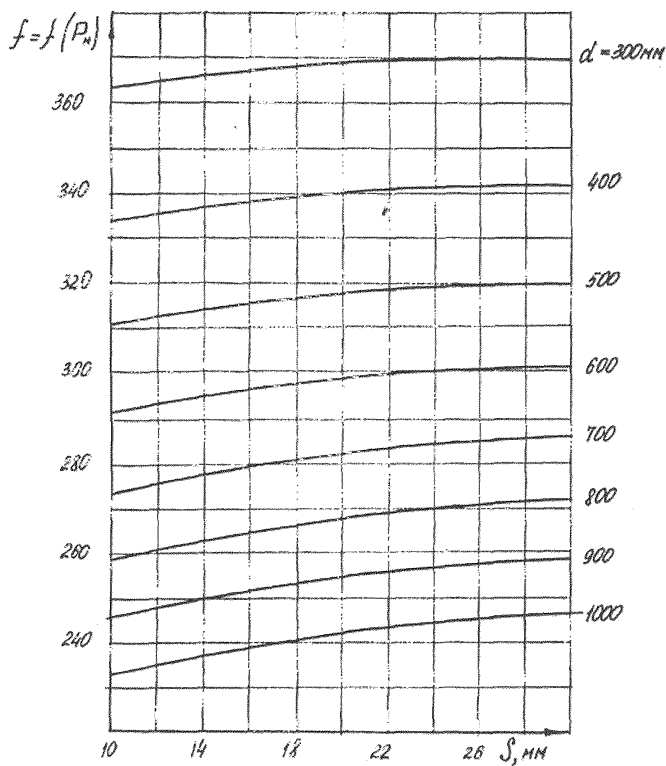
Черт. 17

Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения кольцевого момента M_2 от нагрузки $P_0=I$ ($D = 10500$ мм)



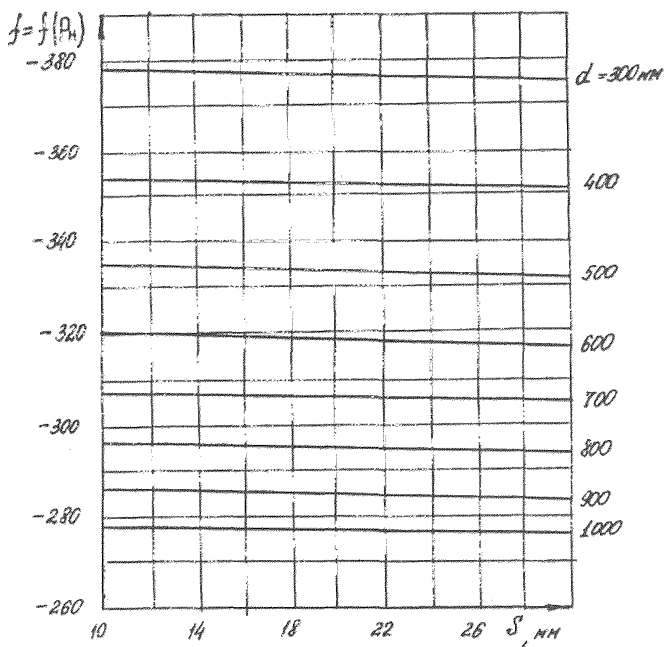
Черт. 18

Величина параметра $f=f(P_n)$ для определения
усилия T_I от нагрузки $P_n=I$ ($L=16000$ мм)



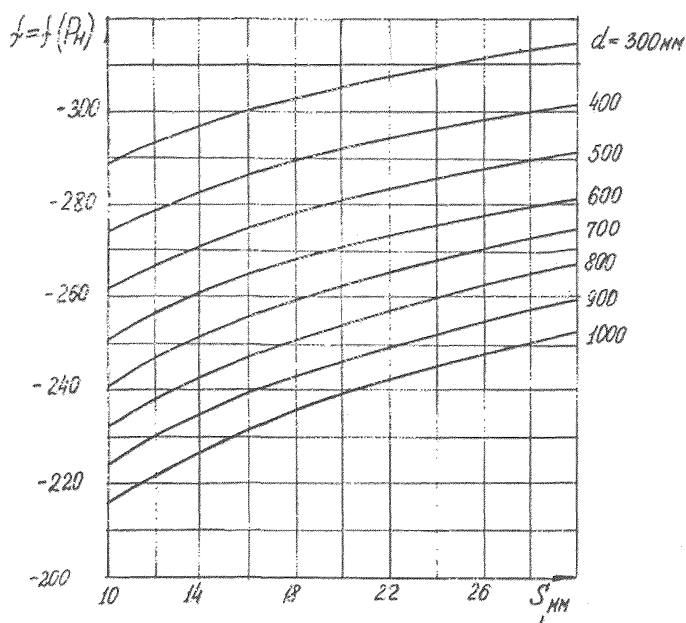
Черт. 19

Величина параметра $f = f(P_H)$ для определения усилия T_2 от нагрузки $P_H = I$ ($D = 16000$ мм)



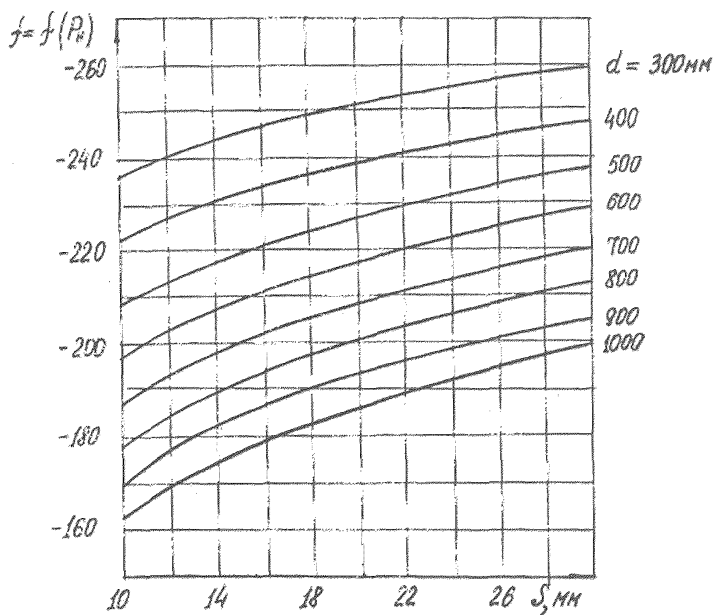
Черт. 20

Величина параметра $f=f(\rho_n)$ для определения момента M_T от нагрузки $P_n=I$ ($D=16000$ мм)



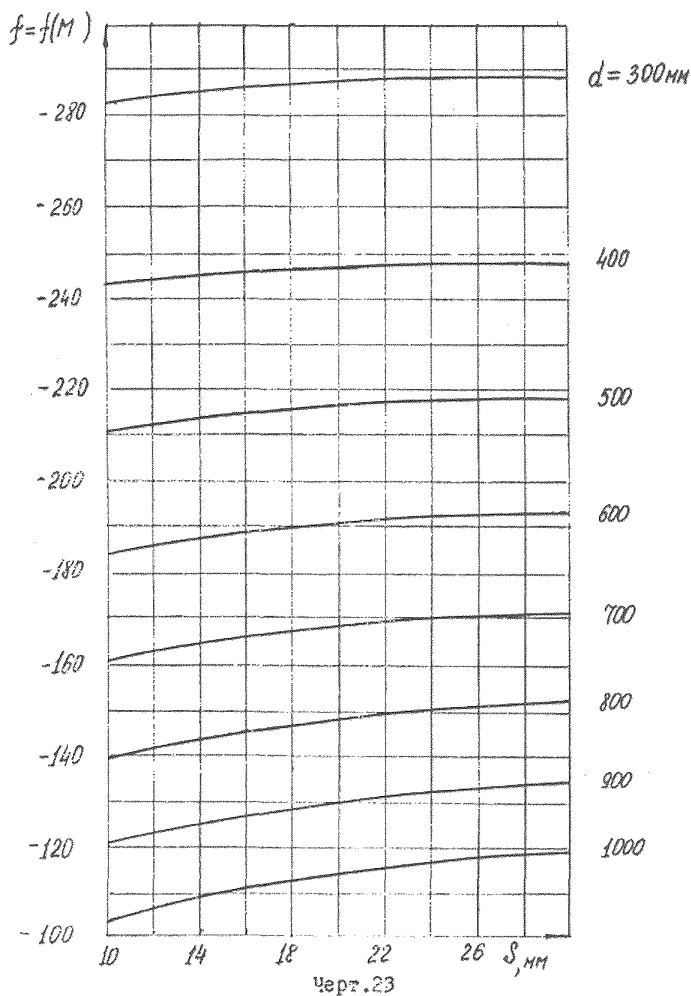
Черт. 21

Величина параметра $f = f(P_n)$ для определения момента M_2 от нагрузки $P_n = I$ ($D = 16000$ мм)

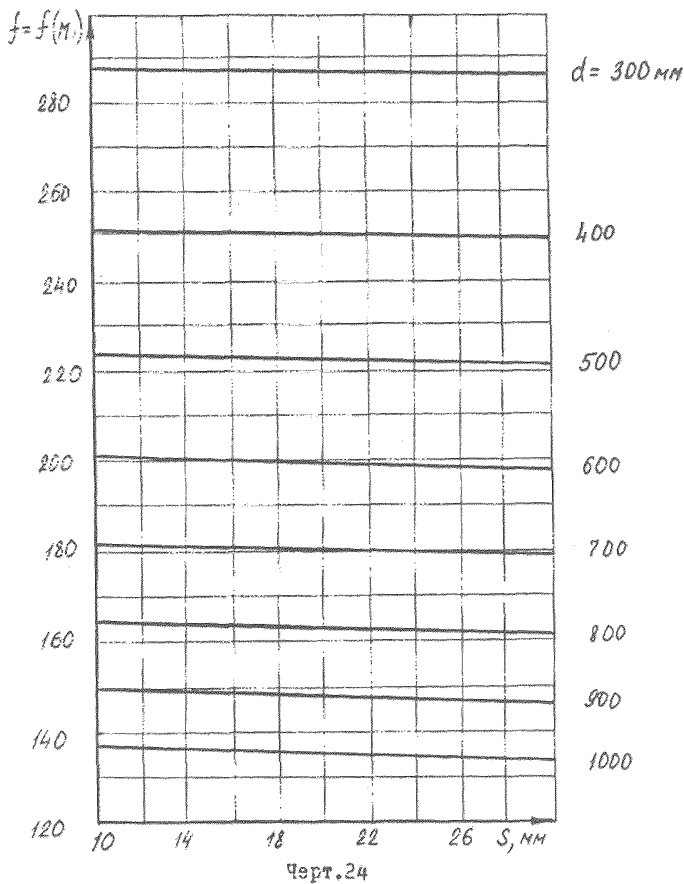


Черт. 22

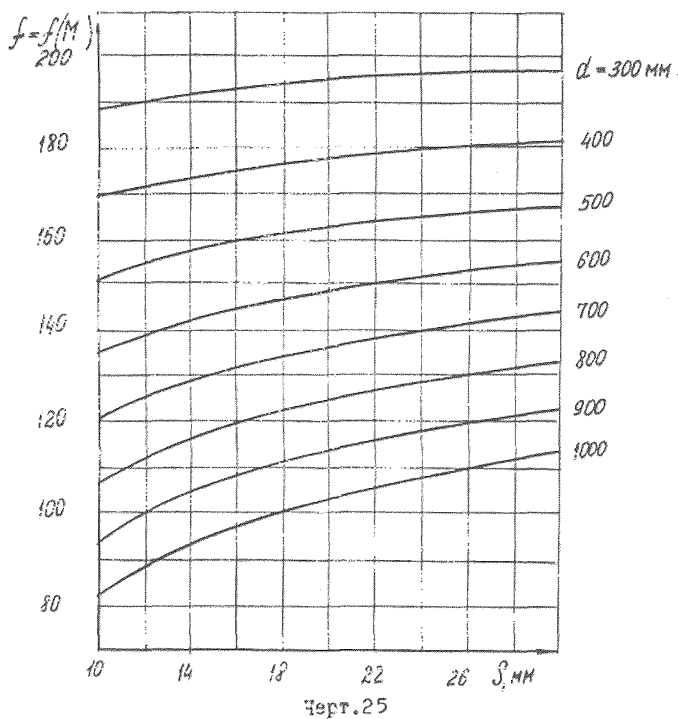
Величина параметра $f=f(M)$ для определения усилия T_I от нагрузки $M=I$ ($D=16000$ мм)



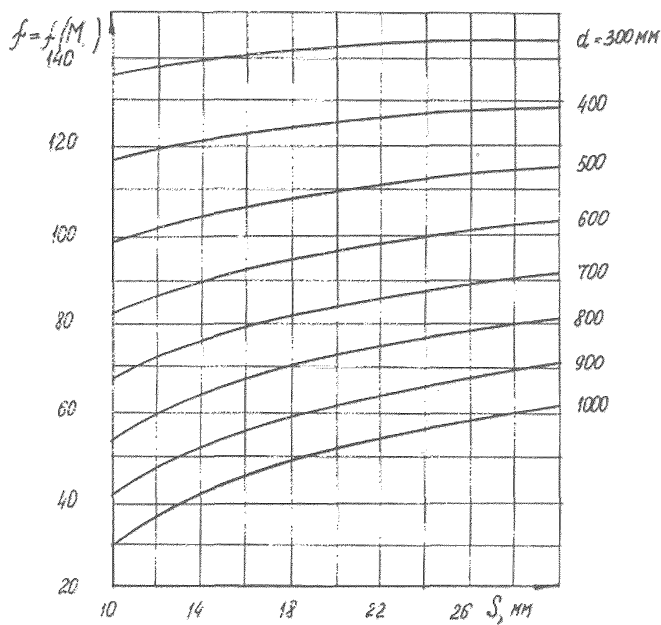
Величина параметра $f=f(M)$ для определения усилия T_2 от нагрузки $M=I$ ($D=16000$ мм)



Величина параметра $f=f(M)$ для определения момента M_I от нагрузки $M=I$ ($D=16000$ мм)

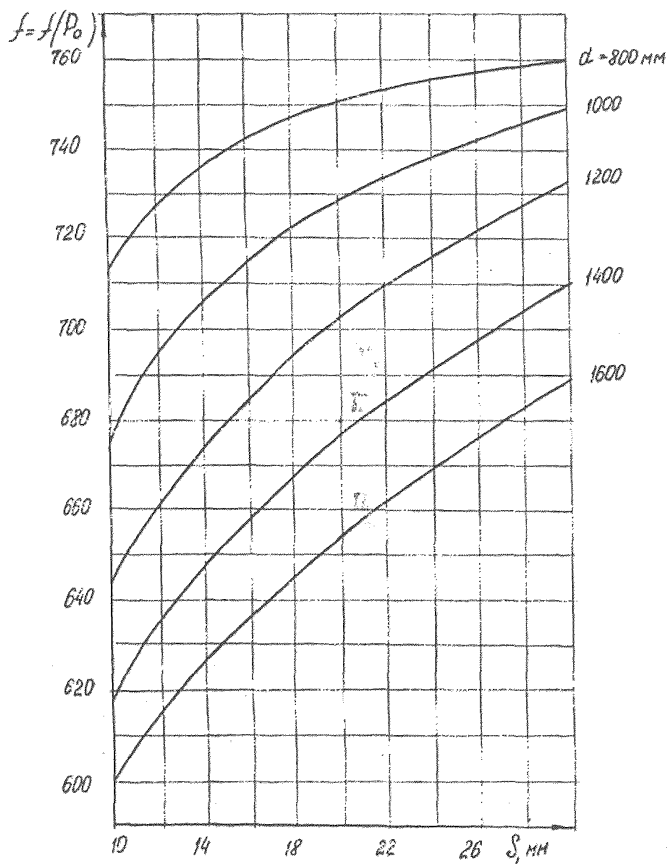


Величина параметра $f=f(M_1)$ для определения момента M_2 от нагрузки $M=I$ ($D=16000$ мм)



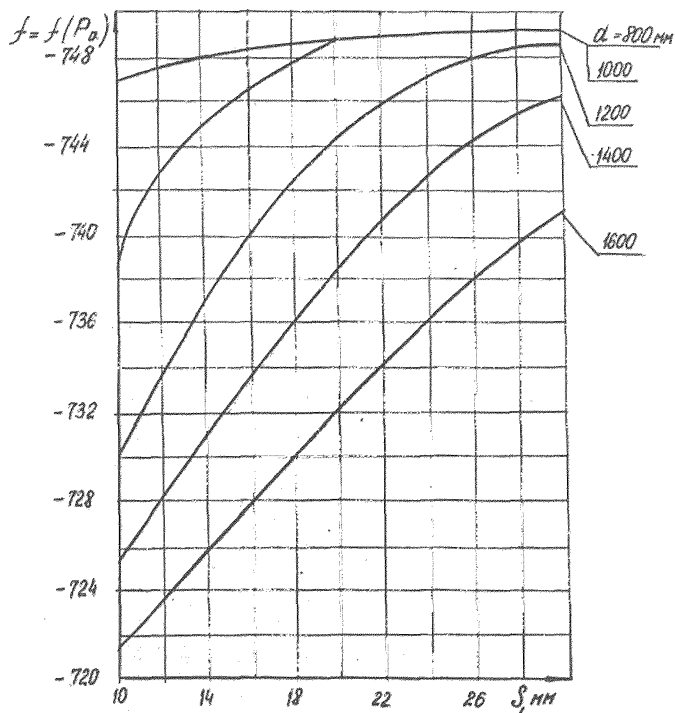
Черт. 26

Величина параметра $f = f(P_0)$ для определения
меридионального усилия T_I от нагрузки $P_0 = I$
($D = 16000$ мм)



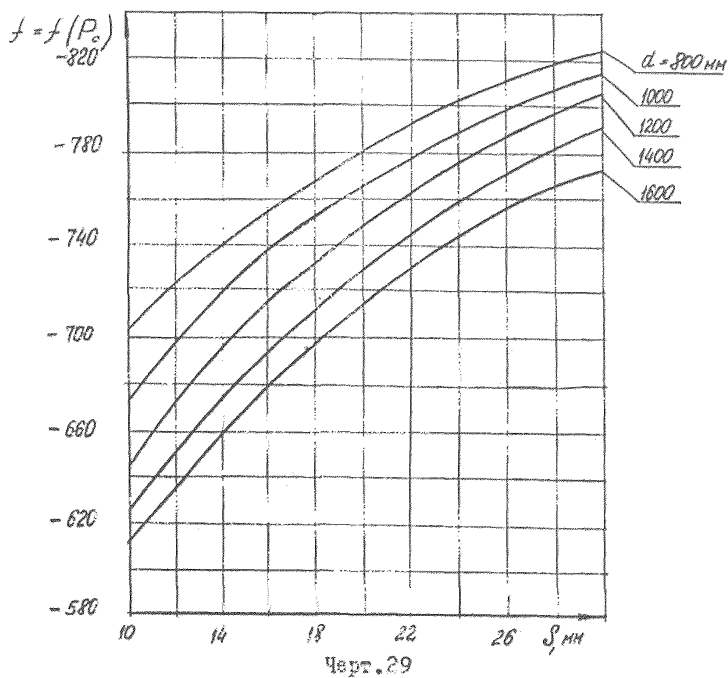
Черт. 27

Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения
кольцевого усилия T_2 от нагрузки $P_0=I$ ($D=16000$ мм)

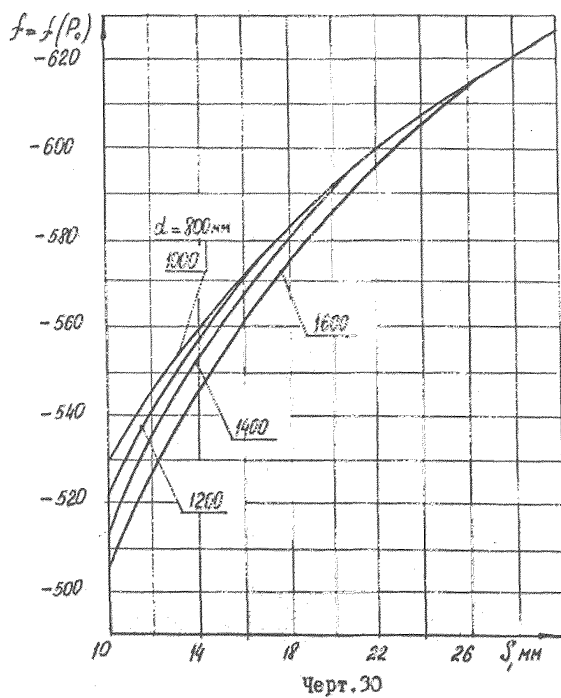


Черт. 28

Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения
меридионального момента M_T от нагрузки $P_0=I$
($I = 16000$ мм)



Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения
кольцевого момента M_2 от нагрузки $P_0=I$
($D = 16000$ мм)



Т а б л и ц а 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 $\times 10^3$
1	0,1023	31	0,2042	51	0,4074	91	0,8128
2	0,1047	32	0,2089	52	0,4169	92	0,8318
3	0,1072	33	0,2138	53	0,4266	93	0,8511
4	0,1096	34	0,2188	54	0,4365	94	0,8710
5	0,1122	35	0,2239	55	0,4467	95	0,8913
6	0,1148	36	0,2291	56	0,4571	96	0,9120
7	0,1175	37	0,2344	57	0,4677	97	0,9333
8	0,1202	38	0,2399	58	0,4786	98	0,9550
9	0,1230	39	0,2455	59	0,4898	99	0,9772
10	0,1259	40	0,2512	60	0,5012	100	1,000
11	0,1286	41	0,2570	71	0,5129	101	1,023
12	0,1316	42	0,2630	72	0,5248	102	1,047
13	0,1349	43	0,2692	73	0,5370	103	1,072
14	0,1380	44	0,2754	74	0,5495	104	1,096
15	0,1413	45	0,2818	75	0,5623	105	1,122
16	0,1445	46	0,2884	76	0,5754	106	1,148
17	0,1449	47	0,2951	77	0,5888	107	1,175
18	0,1514	48	0,3020	78	0,6026	108	1,202
19	0,1549	49	0,3090	79	0,6166	109	1,230
20	0,1585	50	0,3162	80	0,6310	110	1,259
21	0,1622	51	0,3236	81	0,6457	111	1,288
22	0,1660	52	0,3311	82	0,6607	112	1,318
23	0,1698	53	0,3388	83	0,6761	113	1,349
24	0,1738	54	0,3467	84	0,6918	114	1,380
25	0,1778	55	0,3548	85	0,7079	115	1,413
26	0,1820	56	0,3631	86	0,7244	116	1,445
27	0,1862	57	0,3715	87	0,7413	117	1,479
28	0,1905	58	0,3802	88	0,7586	118	1,514
29	0,1950	59	0,3890	89	0,7762	119	1,549
30	0,1995	60	0,3981	90	0,7943	120	1,585

Продолжение таблицы 5.

f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$
I21	1,622	I51	3,236	I81	6,457	211	I2,88
I22	1,660	I52	3,311	I82	6,607	212	I3,18
I23	1,698	I53	3,388	I83	6,761	213	I3,49
I24	1,738	I54	3,467	I84	6,918	214	I3,80
I25	1,778	I55	3,548	I85	7,079	215	I4,13
I26	1,820	I56	3,631	I86	7,244	216	I4,45
I27	1,862	I57	3,715	I87	7,413	217	I4,79
I28	1,905	I58	3,802	I88	7,586	218	I5,14
I29	1,950	I59	3,890	I89	7,762	219	I5,49
I30	1,995	I60	3,981	I90	7,943	220	I5,85
I31	2,042	I61	4,074	I91	8,128	221	I6,22
I32	2,089	I62	4,169	I92	8,316	222	I6,60
I33	2,138	I63	4,266	I93	8,511	223	I6,98
I34	2,188	I64	4,365	I94	8,710	224	I7,38
I35	2,239	I65	4,467	I95	8,913	225	I7,78
I36	2,291	I66	4,571	I96	9,120	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	2,512	I70	5,012	200	10,00	230	I9,95
I41	2,570	I71	5,129	201	10,23	231	20,42
I42	2,630	I72	5,248	202	10,47	232	20,89
I43	2,692	I73	5,370	203	10,72	233	21,38
I44	2,754	I74	5,495	204	10,96	234	21,88
I45	2,818	I75	5,623	205	11,22	235	22,39
I46	2,884	I76	5,754	206	11,48	236	22,91
I47	2,951	I77	5,888	207	11,75	237	23,44
I48	3,020	I78	6,026	208	12,02	238	23,99
I49	3,090	I79	6,166	209	12,30	239	24,55
I50	3,162	I80	6,310	210	12,59	240	25,12

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	131,6	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

Продолжение таблицы 5

f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы
481	6,363	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	38,96	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	29,85	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	171,6	797	242,7	827	342,8
738	123,0	768	173,6	798	245,5	828	346,7
739	124,5	769	175,6	799	248,3	829	350,8
740	125,9	770	177,6	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

2.6. Расчет опорных колонн на прочность и устойчивость.

2.6.1. Расчет опорной колонны на прочность.

Максимальные напряжения в колонне:

$$\sigma_{\max} = \frac{R_{\text{оп}}}{F_K} + \frac{M_K}{W_K} \leq \sigma_{\text{доп}}.$$

Здесь

$$F_K = \pi \cdot d_{\text{ф}} \cdot S_K \quad - \text{площадь поперечного сечения колонны, см}^2;$$

$$W_K = \frac{2 J_K}{d_K} \quad - \begin{array}{l} \text{момент сопротивления} \\ \text{момент поперечного сечения колонны,} \\ \text{см}^3; \end{array}$$

 N_b, N, K, K^*, J_K, M_x - определяются по п.2.5.

2.6.2. Расчет опорной колонны на устойчивость.

При расчете на устойчивость напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{\text{ск}} = \frac{R_{\text{оп}}}{F_K} \leq \varphi_K \cdot \sigma_{\text{доп}}.$$

Здесь

φ_K - коэффициент, зависящий от гибкости сжатой колонны - λ ,
принимается по табл.6

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l_K}{i_K}$$

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

$$\mu = 1$$

$i_k = \sqrt{\frac{J_k}{F_k}}$ - радиус инерции поперечного сечения колонны, см;

При $\frac{d_k}{2S_k} \geq 10$ $i_k \approx 0,354 d_{cp}$

$\sigma_{доп}$ - допускаемое напряжение для материала колонны, принимается в соответствии с п.1.2.

Таблица 6

Значения коэффициентов гибкости

Гибкость элемента $\lambda = \mu l_k / i_k$	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

2.7. Расчет на прочность тросов.

Растягивающие напряжения в тросах определяются

по формуле

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

Горизонтальное перемещение конца колонны

$$\Delta = \frac{N + N_1}{K^*}$$

$N, N_1, K^*, \alpha_j, l_j$ - определяются по п.2.5.

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

Условие прочности будет выполнено, если

$$\sigma < \sigma_{\text{дон}}$$

Приложение

Справочное

Пример расчета шарового резервуара
номинальной емкостью 600 м³

I. Исходные данные.

Геометрический объем резервуара - 606 м³.

Место установки - г.Петрсазловск-Камчатский, что

соответствует по СНиП П-6-74 "Строительные нормы и правила.

Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия" и СНиП П-7-81 ④

"Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования"

VI району по интенсивности снегового покрова, IV району по

скоростному напору ветра и 8-ми баллам сейсмичности.

Расчет выполнен только для режима эксплуатации. ②

По таб. I, 2, 3 имеем

$$q_p = 0,0250 \text{ кгс/см}^2$$

$$q_s = 0,0055 \text{ кгс/см}^2$$

$$K_e = 0,05$$

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

$$t_{расч} = 20^\circ\text{C}$$

$$D = 1050 \text{ см} - \text{внутренний диаметр оболочки;}$$

$$b = 60 \text{ см} - \text{ширина подкладного листа;}$$

$$l_f = 160 \text{ см} - \text{длина подкладного листа;}$$

$$n = 8 - \text{количество опор}$$

- $d_k = 27,3$ см - наружный диаметр колонны;
 $S_k = 1,2$ см - толщина стенки колонны;
 $l_k = 800$ см - длина колонны;
 $l'_k = 700$ см - длина колонны до места крепления тяжей;
 $l_o = 800$ см - расстояние от земли до центра шара;
 $d_r = 3,2$ см - диаметр троса;
 $\alpha_o = 90^\circ$ - центральный угол середины опоры (опоры установлены в экваториальной зоне);
 $\gamma_{ж} = 0,0007$ кгс/см³ - удельный вес жидкого продукта;

Коэффициент заполнения резервуара продуктом принимаем равным I

- $\gamma = 0,00785$ кгс/см³ - удельный вес стали;
 $G_o = 50000$ кгс - собственный вес резервуара;
 $\rho = 6$ кгс/см² - внутреннее давление;
 $E = 2 \cdot 10^6$ кгс/см² - модуль упругости материала сферы и опорной конструкции при расчетной температуре;
 $\nu = 0,3$ - коэффициент Пуассона;
 $c = 0$ - прибавка на коррозию;
 $\varphi_c = 1$ - коэффициент прочности сварных соединений;
 $g = 980$ см/сек² - ускорение земного тяготения;

Материал оболочки - сталь 09Г2С, для которой

$$\sigma_{дл} = 1700 \text{ кгс/см}^2$$

$$\sigma_r = 2800 \text{ кгс/см}^2$$

Материал колонны и тяжей - сталь 20. Для нее

$$\sigma_{дон} = 1470 \text{ кгс/см}^2$$

$$\sigma_T = 2100 \text{ кгс/см}^2$$

2. Определение толщины стенки резервуара.

а) от действия внутреннего давления, равного

$$\begin{aligned} P_p &= (p + 0,15p + 1 \cdot \gamma_{ж} \cdot D) \cdot 0,9 = \\ &= (6 \cdot 1,15 + 1 \cdot 0,0007 \cdot 1050) \cdot 0,9 = \\ &= 6,87 \text{ кгс/см}^2 \approx 6,9 \text{ кгс/см}^2 \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned} S &= \frac{P_p \cdot D}{4 \cdot \psi_c \cdot \sigma_{дон} - P_p} + C + C_I = \frac{6,9 \cdot 1050}{4 \cdot 1 \cdot 1700 - 6,9} + C + C_I = \\ &= 1,062 + C + C_I \end{aligned}$$

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

$$S = S_1 = 1,6 \text{ см}$$

б) проверка оболочки резервуара на устойчивость от возможного вакуума.

При условии

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

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

Необходимая толщина стенки определяется по формуле

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

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 K_1 по черт.5

$$K_1 = 1$$

Коэффициент гидростатического давления жидкости в области опоры

$$K_0 = h_0 - 1 = 1$$

Толщина оболочки в опорной зоне

$$S_0 = S + S_1 = 3,2 \text{ см}$$

Объем, занимаемый жидкостью

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

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

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

$$K_1 = \frac{12 \cdot E \cdot J_K}{l_K^3} .$$

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

$$J_K = 0,393 d_{\text{оп}}^4 \cdot S_K = 0,393 \cdot 26,1^3 \cdot 1,2 = 8385 \text{ см}^4 ;$$

$$d_{\text{оп}} = d_K - S_K = 27,3 - 1,2 = 26,1 \text{ см} ;$$

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

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

$$K_2 = 4 \cdot E F \left[\frac{\cos^2 L_1}{l_1} + \frac{\cos^2 L_2}{l_2} \right] ;$$

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

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

$$l_1 = \sqrt{a_1^2 + l_K^2} = \sqrt{154^2 + 700^2} = 10^2 \sqrt{2,36 + 49} = 716 \text{ см} ;$$

$$l_2 = \sqrt{a_2^2 + l_K^2} = \sqrt{371^2 + 700^2} = 10^2 \sqrt{13,8 + 49} = 797 \text{ см} ;$$

$$\cos L_1 = \frac{a_1}{l_1} = \frac{154}{716} = 0,215 ; \cos^2 L_1 = 0,0463 ; \frac{\cos^2 L_1}{l_1} = 0,645 \cdot 10^{-4} ;$$

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

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

$$K_2 = 4 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 8,05 \cdot [0,645 \cdot 10^{-4} + 2,78 \cdot 10^{-4}] = \\ = 8 \cdot 8,05 \cdot 10^6 \cdot 3,425 \cdot 10^{-4} = 220 \cdot 10^2 = 22057 \text{ кгс/см};$$

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

Вес жидкого продукта

$$G_{ж} = \gamma_{ж} \cdot V = 0,0007 \cdot 606 \cdot 10^6 = 424200 \text{ кгс}.$$

Вес опорной конструкции

$$G_{оп} = 5860 \text{ кгс}.$$

Расчетный вес металлических конструкций

$$G_k = G_0 + 0,5 G_{оп} = 50000 + 0,5 \cdot 5860 = 53000 \text{ кгс}.$$

Период собственных колебаний шарового резервуара

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{G_k + K_0 G_k}{K^* g}} = 2\pi \sqrt{\frac{53000 + 1 \cdot 424,2 \cdot 10^3}{25200 \cdot 980}} = 0,875 \text{ сек}$$

Коэффициент динамичности при действии сейсмической нагрузки β_0 определяется по формуле

$$\beta_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,875} = 1,143 \frac{1}{\text{сек}}$$

$$\text{При } \frac{\ell_k}{d_k} = \frac{800}{27,3} = 29,3 > 25$$

$$K_0 = 1,5$$

$$\beta = K_0 \cdot \beta_0 = 1,5 \cdot 1,143 = 1,714.$$

Сейсмическая сила, действующая на резервуар, равняется

$$N = (G_K + \bar{K}_1 \cdot G_*) \beta \cdot K_c = \\ = (53000 + 424200) \cdot 1,714 \cdot 0,05 = 40900 \text{ кгс.}$$

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

$$\xi = 1,76$$

Тогда

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

Коэффициент возрастания скоростного напора ξ для высоты $z_0 = 8 \text{ м}$ определяется по графику на черт.3 и равен

$$\xi = 0,65$$

Горизонтальная составляющая ветровой нагрузки

$$N_H = \frac{4}{3} \pi R^2 q_c \beta_1 \xi = \\ = \frac{4}{3} \pi \cdot 525^2 \cdot 0,0055 \cdot 1,616 \cdot 0,65 = 6667 \text{ кгс}$$

Вертикальная составляющая снеговой нагрузки

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

Максимальная реакция опоры

$$\begin{aligned}
 R_{on} &= \frac{G_o + G_k + N_o}{n} + \frac{l_k}{R} \cdot \frac{K_1}{K^*} (N + N_k) \\
 &= \frac{50000 + 424200 + 14400}{8} + \\
 &\quad + \frac{800}{525} \cdot \frac{393}{25200} \cdot (40900 + 6667) = 62208 \text{ кгс}
 \end{aligned}$$

Внутреннее давление в опорной области

$$\begin{aligned}
 p_o &= p + (n_o - 1 + \cos \alpha_o) R \cdot \gamma_k = \\
 &= 6 + (2 - 1) \cdot 525 \cdot 0,0007 = 6,4 \text{ кгс/см}^2
 \end{aligned}$$

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

$$M = M_{из} + M_k$$

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

$$\begin{aligned}
 M_k &= 0,5 \frac{K_1}{K^*} \frac{l_k}{R} (N_k + N) = 0,5 \cdot \frac{393}{25200} \cdot 800 (6667 + \\
 &\quad + 40900) = 296727 \text{ кгс} \cdot \text{см}
 \end{aligned}$$

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

Сосредоточенная нормальная сила

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

Меридиональные и кольцевые мембранные напряжения от каждого вида нагрузки

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

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

$$\sigma_1^*(M) = \frac{4 \cdot D \cdot M}{\pi \cdot d^3 (S-c)} = \frac{4 \cdot 1050 \cdot 446027}{\pi \cdot 60^3 (1,6-0)} = 1726 \text{ кгс/см}^2 ;$$

$$\sigma_2^*(M) = - 1726 \text{ кгс/см}^2 ;$$

$$\sigma_1^*(p_0) = \frac{D \cdot p_0}{4(S-c)} = \frac{1050 \cdot 6,4}{4 \cdot 1,6} = 1050 \text{ кгс/см}^2 ;$$

$$\sigma_2^*(p_0) = 1050 \text{ кгс/см}^2 .$$

Суммарные меридиональные и кольцевые мембранные напряжения

$$\sigma_1^* = \sigma_1^*(P_n) + \sigma_1^*(M) + \sigma_1^*(p_0) = 1726 + 1050 = 2776 \text{ кгс/см}^2$$

$$\sigma_2^* = \sigma_2^*(P_n) + \sigma_2^*(M) + \sigma_2^*(p_0) = - 1726 + 1050 = - 676 \text{ кгс/см}^2$$

По графикам черт. II+I8 в соответствии с индексом M при $d = b = 600$ мм, а для p_0 при $d = 0,5 b$, $= 800$ мм и $S = 16$ мм определяются параметры $f(M)$, $f(p_0)$ для силовых факторов T_1 , T_2 , M_1 , M_2 .

Для

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

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

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

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

$$T_I \rightarrow f = f(p_0) = 680$$

$$T_2 \rightarrow f = f(p_0) = -707$$

$$M_I \rightarrow f = f(p_0) = -700$$

$$M_2 \rightarrow f = f(p_0) = -535$$

По полученным значениям параметра f из табл.5 определяем значения T_I , T_2 , M_I , M_2 от единичных значений силовых факторов $M = I$, $p_0 = I$ со знаком, соответствующим параметру f и после умножения табличного значения на величину нагрузки получаются действительные значения усилий и моментов.

В рассматриваемом случае

$$T_I(P_H) = T_2(P_H) = M_I(P_H) = M_2(P_H) = 0, \text{ так как } P_H = 0$$

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

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

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

$$M_2(M) = 0,0006918 \cdot 446027 = 308 \text{ кгс.см/см};$$

$$T_I(p_0) = 63,1 \cdot 6,4 = 404 \text{ кгс/см};$$

$$T_2(p_0) = -86,1 \cdot 6,4 = -551 \text{ кгс/см};$$

$$M_I(p_0) = - 79,43 \cdot 6,4 = - 508 \text{ кгс} \cdot \text{см/см};$$

$$M_2(p_0) = - 11,89 \cdot 6,4 = - 76 \text{ кгс} \cdot \text{см/см}.$$

Меридиональные и кольцевые усилия краевого эффекта

$$T_I = - 2130 + 404 = - 1726 \text{ кгс/см};$$

$$T_2 = 3015 - 551 = 2464 \text{ кгс/см};$$

$$M_I = 1022 - 508 = 514 \text{ кгс} \cdot \text{см/см};$$

$$M_2 = 308 - 76 = 232 \text{ кгс} \cdot \text{см/см}.$$

Меридиональные и кольцевые мембранные и изгибные напряжения

$$\sigma_1 = \sigma_1^* + \frac{T_1}{S-c} = 2776 - \frac{1726}{1,6} = 1697 \text{ кгс/см}^2$$

$$\sigma_2 = \sigma_2^* + \frac{T_2}{S-c} = - 676 + \frac{2464}{1,6} = 864 \text{ кгс/см}^2$$

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

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

Эквивалентные мембранные и изгибные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} = \sqrt{1697^2 + 864^2 - 1697 \cdot 864} = 10^3 \sqrt{2,16} = \\ &= 1470 \text{ кгс/см}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{из} &= \sqrt{\sigma_{из1}^2 + \sigma_{из2}^2 - \sigma_{из1} \cdot \sigma_{из2}} = \sqrt{1204^2 + 544^2 - 1204 \cdot 544} = \\ &= 10^3 \sqrt{1,090576} = 1044 \text{ кгс/см}^2 \end{aligned}$$

Проверяем условие прочности в области максимально нагруженной опоры

$$1) \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 + 0,8 \frac{\sigma_{из}}{\sigma_T} = \left(\frac{1470}{2800} \right)^2 + 0,8 \frac{1044}{2800} = \\ = 0,2756 + 0,2983 = 0,574 < 1$$

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

Условия прочности выполняются.

4. Расчет на прочность и устойчивость опорных колонн.

а) Расчет колонны на прочность

$$F_K = A \cdot d_{cp} \cdot S_K = A \cdot (27,3 - 1,2) \cdot 1,2 = \\ = A \cdot 26,1 \cdot 1,2 = 98,3 \text{ см}^2$$

$$J_K = 0,393 d_{cp}^3 \cdot S_K = 0,393 \cdot 26,1^3 \cdot 1,2 = 8385 \text{ см}^4$$

$$W_K = \frac{J_K}{0,5 d_K} = 642,5 \text{ см}^3$$

$$l_K = 0,354 \cdot d_{cp} = 0,354 \cdot 26,1 = 9,24 \text{ см}$$

Изгибающий момент в колонне

$$M_K = 0,5 \frac{K_1}{K^*} l_K (N_6 + N) = 0,5 \cdot \frac{393}{25200} \cdot 800 \cdot (6667 + \\ + 40900) = 296727 \text{ кгс·см.}$$

Максимальные напряжения в колонне

$$\sigma_{max} = \frac{R_{ср}}{F_K} + \frac{M_K}{W_K} = \frac{62208}{98,3} + \frac{296727}{642,5} =$$

$$= 633 + 462 = 1095 \text{ кгс/см}^2 ;$$

$$\sigma_{дон} = 1470 \text{ кгс/см}^2 .$$

б) Расчет на устойчивость

Приведенная длина колонны

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

Гибкость колонны

$$\lambda_K = \frac{l_{пр}}{i_K} = \frac{800}{9,24} = 86,6$$

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

$$\varphi_K = 0,6831$$

Условие устойчивости

$$\sigma_{уст} = \frac{R_{ср}}{F_K} \leq \varphi_K \cdot \sigma_{дон}$$

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

выполняется.

5. Расчет на прочность талей .

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

$$\cos \alpha_2 = \frac{a_2}{l_2} = 0,469$$

$$\sigma = \frac{\Delta \cdot E}{l_2} \cdot \cos \alpha_2 ;$$

$$\Delta = \frac{N + N_0}{K^*} = \frac{47567}{25200} = 1,888 \text{ см}$$

$$l_2 = 791 \text{ см}$$

Тогда

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

Условие прочности не выполняется, так как

$$\sigma = 2238 > \sigma_{\text{доп}} = 1470 \text{ (кгс/см}^2\text{)}$$

Увеличиваем диаметр тросов до $d_T = 53 \text{ мм}$

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

$$F_T = 0,785 \cdot 5,3^2 = 22 \text{ см}^2$$

$$G_{\text{оп}} = n \cdot l_K \cdot F_K \gamma + 2n \cdot l_T \cdot F_T \gamma = 8 \cdot 800 \cdot 98,3 \cdot 0,785 \cdot 10^{-3} + \\ + 16 \cdot 22 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} \cdot 810 = 4920 + 2470 = 7390 \text{ кгс}$$

$$G_K = 50000 + 0,5 \cdot 7390 = 53700 \text{ кгс}; \quad l_T = 810 \text{ см}$$

$$K_2 = 4EF \left[\frac{\cos^2 \alpha_1}{l_1} + \frac{\cos^2 \alpha_2}{l_2} \right] = \\ = 4 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 22 \cdot 3,425 \cdot 10^{-4} = 60000 \text{ кгс/см}$$

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

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

По черт. 4 коэффициент динамичности ξ при действии ветровой нагрузки равен $\xi = 1,48$.

Тогда

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

$$N_6 = \frac{q}{3} \cdot 525^2 \cdot 0,0055 \cdot 1,52 \cdot 0,65 = 6270 \text{ кгс} ;$$

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

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

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

$$\begin{aligned} R_{\text{сн}} &= \frac{G_0 + G_x + N_6}{8} + \frac{L_x}{L} \cdot \frac{K_1}{K^*} (N + N_6) = \\ &= \frac{53700 + 424200 + 14400}{8} + \frac{800}{525} \cdot \frac{393}{63144} (64815 + \\ &+ 6270) = 61712 + 674 = 62386 \text{ кгс} ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_K &= 0,5 \cdot \frac{K_1}{K^*} \cdot L_x (N_6 + N) = 0,5 \cdot \frac{393}{63144} \cdot 800 (6270 + \\ &+ 64815) = 176970 \text{ кгс-см.} \end{aligned}$$

Максимальные напряжения в колонне

$$\sigma_{\max} = \frac{63386}{98,3} + \frac{176970}{642} = 644 + 276 = 920 < 1470 \text{ кгс/см}^2$$

Условие прочности выполняется

Перемещение конца колонны

$$\Delta = \frac{N + M_2}{K^*} = \frac{71085}{53144} = 1,126 \text{ см}$$

Максимальное напряжение в тале

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

Проверим, удовлетворяет ли принятые первоначально размеры талей $d_T = 32$ мм условиям прочности, если резервуар будет установлен в сейсмичном районе.

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

$$\Delta = \frac{M_2}{K^*} = \frac{6687}{25200} = 0,265 \text{ см}$$

$$\sigma = \frac{\Delta \cdot E}{l_2} \cos \alpha_2 = \frac{0,265 \cdot 2 \cdot 10^6}{791} \cdot 0,469 = 314 \text{ кгс/см}^2$$

Прочность талей достаточна, так как

$$\sigma = 314 \text{ кгс/см}^2 < [\sigma] = 1470 \text{ кгс/см}^2$$

Таким образом, при установке шарового резервуара в сейсмическом районе достаточно принять $d_r = 32$ мм.

Зам.директора Северодонецкого
филиала НИИХИММАШ



В.А.Пименов

Зав.отделом стандартизации

И.Н.Пономаренко

Зав.лабораторией ИО

Степанов

С.В.Степанов

Зав.сектором прочности
химоборудования

Модестова

Р.В.Модестова

/Руководитель темы

Самойленко

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 (Техгортехнадзором СССР)

Зам.начальника Управления

письмом №1382/826
от 08.10.78г

А.И.Мурачев

Заче
Директор НИИХИММАШ

начальник шарового научно-
исследовательского отдела
стандартизации

И.И.Румянцев

Дюкин

В.В.Дюкин

Продолжение см. на следующем листе

Зам. главного инженера

ПО "Уралхиммаш"

тов. Пермяков Г.Н.

письмом № 44^а-747

20.07.1978г

Зам. главного инженера

института ЦНИИПроектгидроконструкция

тов. Павлов Б.Г.

письмом № 10-352/7

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 шаровые 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 19 организаций.

Замечания и предложения, присланные до 10 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