



**ОПОРЫ  
ВЕРТИКАЛЬНЫХ И  
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ**



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Тамбовский государственный технический университет"

**ОПОРЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И  
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Методические указания для студентов 4–5 курсов  
дневного и заочного отделений  
специальностей 240801, 260601, 280202



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2005

УДК 66.01.001.24  
ББК Л11-5-04я73-5  
К65

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Р е ц е н з е н т

Доктор технических наук, профессор  
*С.И. Дворецкий*

С о с т а в и т е л ь

*В.Б. Контева*

5      Опоры вертикальных и горизонтальных аппаратов:  
Метод. указ. / Сост. В.Б. Коптева. Тамбов: Изд-во Тамб.  
гос.                      техн.                      ун-та,                      2005.  
24 с.

Даны основные типы опор вертикальных и горизонтальных аппаратов, приведены расчеты на прочность и устойчивость в месте крепления опор, рассмотрены принципы конструирования.

Предназначены для студентов 4–5 курсов дневного и заочного отделений специальностей 240801, 260601, 280202.

УДК 66.01.001.24  
ББК Л11-5-04я73-5

© Тамбовский государствен-  
ный  
технический университет  
(ТГТУ), 2005

Учебное издание

ОПОРЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И  
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Методические указания

С о с т а в и т е л ь

КОПТЕВА Вера Борисовна

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 30.08.2005.

Формат 60 × 84/16. Бумага газетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Объем: 1,4 усл. печ. л.; 1,5 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 434

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ВВЕДЕНИЕ

Опоры и лапы служат для установки аппаратов на фундаменты и несущие конструкции. Только простые резервуары не имеют лап и устанавливаются непосредственно на фундамент. Размеры и форма опорного устройства зависят в основном от величины и характера нагрузок, от материала, из которого изготовлен аппарат, от веса аппарата, а также от места его расположения. Если аппарат подвержен сотрясениям и динамическим усилиям, то его опоры делаются в виде массивной жесткой рамы, которая не только передает вес аппарата на опорную поверхность фундамента, но и служит для поглощения динамических усилий и вибраций.

В большинстве случаев опоры аппаратов динамических нагрузок не испытывают.

В зависимости от рабочего положения аппарата различают опоры для вертикальных аппаратов и опоры для горизонтальных аппаратов.

## 1 ОПОРЫ ТИПА ЛАПЫ И СТОЙКИ

### 1.1 КОНСТРУКЦИИ ОПОР

Невысокие вертикальные аппараты обычно устанавливают на стойках, когда их размещают внизу в помещении, или на подвесных лапах, когда аппарат размещают между перекрытиями в помещении или на специальных стальных конструкциях. Число лап на вертикальных аппаратах берут от двух до четырех, стойки – не менее трех.

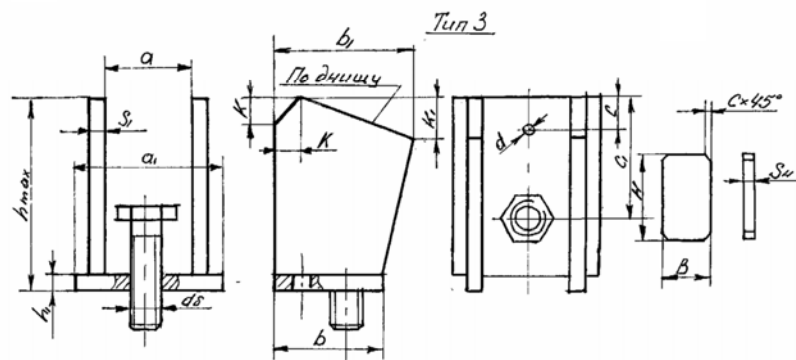
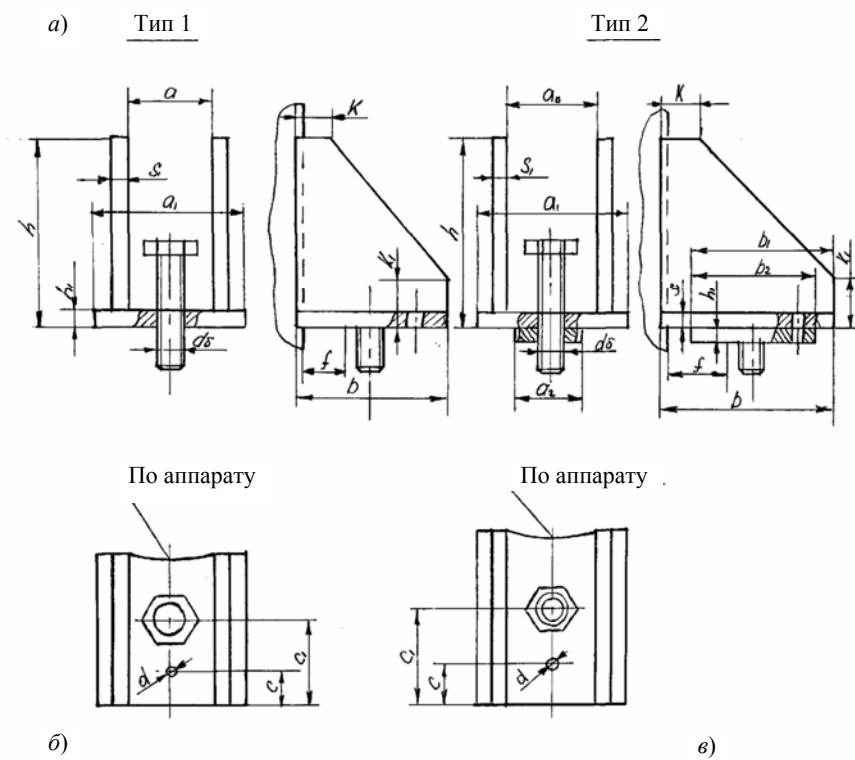
Конструкции стандартных опор для вертикальных аппаратов приведены на рис. 1. Тип I (лапы) служит для аппаратов без теплоизоляции, тип 2 (лапы) с увеличенным вылетом – для аппаратов с изоляцией, тип 3 (стойки) – для аппаратов с эллиптическим и коническим днищем. В зависимости от толщины стенки корпуса аппарата опоры привариваются или непосредственно к корпусу или к накладному листу. Материал деталей этих опор выбирается из условий эксплуатации (табл. 1 – 3).

В опорах имеется регулировочный болт, служащий для установки вертикальности при монтаже. После установки вертикальности болт выкручивается.

Необходимость установки накладного листа определяется после проверки опоры на месте приварки лапы. Накладные листы привариваются к аппарату сплошным швом.

Если опоры выполнены из углеродистой стали, а аппарат из коррозионной стали, то накладные листы должны выполняться из стали той же марки, что и корпус аппарата.

Выбранная стандартная опора расчетом не проверяется. Расчету подлежит обечайка цилиндрического аппарата, на которую действуют местные нагрузки, вызываемые опорными лапами. Расчет ведется по ГОСТ 26202–84.



**Рис. 1 Конструкции стандартных опор**

Условное обозначение опоры типа 1 с допускаемой нагрузкой  $Q = 25$  кН: Опора 1-2500 ОСТ 26-665-79.

## 2 Опоры (стойки) для вертикальных аппаратов типа 3, ОСТ 26-655–79

$Q$ , кН	$a$	$a_1$	$b$	$b_1$	$c$	$c_1$	$h_{\max}$	$h_1$	$s_1$	$k$	$k_1$	$d$	$d_6$
4	75	11 0	85	12 0	22	30	220	10	6	6	60	19	М1 2
10	90	12 5	11 5	16 0	22	60	295	14	8	10	80	19	М1 6
25	12 5	16 5	14 0	20 0	22	80	365	16	10	10	10 5	24	М2 0
40	15 0	20 5	18 0	24 0	40	10 0	440	20	12	12	12 5	35	М2 4
63	18 5	24 5	21 0	28 0	40	12 0	515	24	14	15	15 0	35	М3 0
100	25 0	32 5	25 0	36 0	40	16 0	660	30	18	20	18 0	42	М3 6
160	30 0	39 0	34 0	48 0	60	20 0	875	36	24	25	25 0	42	–
250	36 0	48 0	49 0	68 0	60	24 0	124 0	40	34	35	35 0	42	–

П р и м е ч а н и е: размеры  $b_1$  и  $k_1$  в опорах для конических днищ справочные.

Опоры и накладные листы выбираются по ОСТ 26-665–79 в зависимости от нагрузки, приходящейся на одну опору.

Условное обозначение опоры типа 3 с допускаемой нагрузкой  $Q = 63$  кН: Опора 3-6300 ОСТ 26-665–79.

### 3 Накладные листы под опоры (лапы) типов 1 и 2 для вертикальных аппаратов

$Q$ , кН	Тип опо- ры	$B$	$H$	$C$	$S_n$	$Q$ , кН	Тип опо- ры	$B$	$H$	$C$	$S_n$
1,6	1	75	120	8	4, 6, 8, 10	100, 0	1 2	40 0	650	32	10,
	2		155						820		12, 16, 20
4,0	1	125	200	10	6, 8, 10, 12	160, 0	1 2	50 0	810	40	12,
	2		255						102 0		16, 20, 24
10,0	1	150	250	12	8, 10, 12, 16	250, 0	1 2	60 0	970	48	12,
	2		310						123 0		16, 24, 28
25,0	1	200	330	16	10, 12, 16	400, 0	1 2	70 0	114	50	20,
	2		410						144 0		24
40,0	1	250	405	20	10, 12, 16, 20	630, 0	1 2	90 0	148	55	28
	2		510						186 0		
63,0	1	300	490	24	10, 12, 16, 20	630, 0	1 2	90 0	186	55	28
	2		620						186 0		

Примечание: 1 Размер  $S_n$  определяется расчетом и округляется в большую сторону до ближайшего значения по табл. 3, но не должен быть меньше толщины обечайки.

2 Сторона накладного листа с размером  $B$  изгибается по наружному диаметру аппарата.

Условное обозначение накладного листа для опоры типа 1 с допускаемой нагрузкой  $Q = 25$  кН: Накладной лист 1-2500-8 ОСТ 26-665-79.

#### 1.2 РАСЧЕТ ОПОР – ЛАП

Предельное напряжение изгиба в месте крепления опор определяется в зависимости от местных мембранных напряжений и степени нагрузки общими мембранными напряжениями по зависимости

$$[\sigma_i] = K_1 [\sigma] \frac{n_T}{K_2}, \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента  $\nu_1$ , представляющего отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба, и коэффициента  $\nu_2$ , учитывающего степень нагрузки конструкции общими мембранными напряжениями;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение элемента аппарата, к которому крепится опора, МПа;  $n_T$  – коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

$$K_1 = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{1+3\nu_1\nu_2}{3\nu_1^2} \right) \left( \pm \sqrt{\frac{9\nu_1^2(1-\nu_2^2)}{(1+3\nu_1\nu_2)^2} + 1} - 1 \right); \\ 1,5(1-\nu_2^2) - \text{при } \nu_1 = 0; \end{array} \right\} \quad (2)$$

$K_1 \geq 0$  – при  $\nu_1 \neq 0$ ;

$\nu_1 = 0,3$ .

$K_2 = 1,2$  для рабочих условий;

$K_2 = 1,0$  для условий испытания;

$$\nu_2 = \frac{K_2 \overline{\sigma}_m}{n_T [\sigma] \varphi}, \quad (3)$$

где  $\overline{\sigma}_m$  – общее мембранное напряжение в элементе аппарата, к которому крепится опора, МПа;  $\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва.

Общее окружное мембранное напряжение в цилиндрической обечайке рассчитывается по формуле

$$\overline{\sigma}_m = \frac{p_R D_R}{2(s-c)}. \quad (4)$$

Общее меридиональное мембранное напряжение в цилиндрической обечайке следует определять по формуле

$$\overline{\sigma}_{mx} = \frac{p_R D_R}{4(s-c)} + \frac{1}{\pi D_R (s-c)} \left( F \pm \frac{4M}{D_R} \right). \quad (5)$$

Расчетное значение диаметра  $D_R$  для цилиндрической обечайки равно ее внутреннему диаметру.

### 1.3 РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ АППАРАТОВ В МЕСТЕ КРЕПЛЕНИЯ ОПОРНЫХ ЛАП

Для проверки прочности места крепления опорных лап к цилиндрическим обечайкам принимают, что направление действия усилия от опоры параллельно оси обечайки.

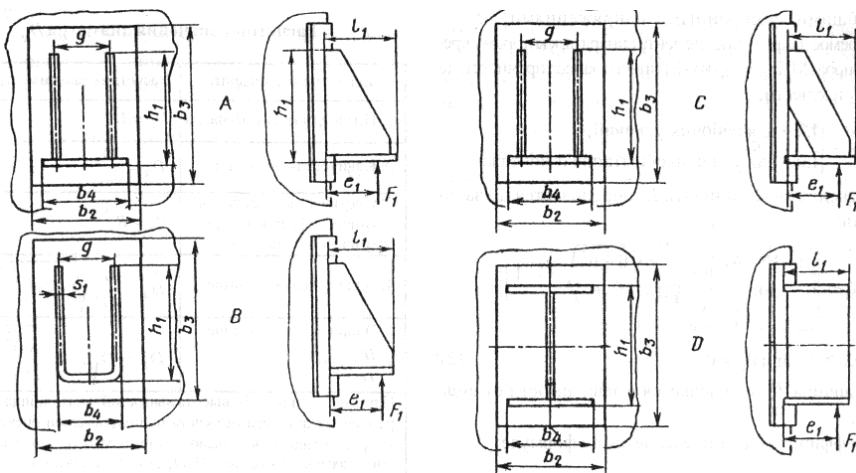


Рис. 2 Геометрические характеристики опорных лап

Расчетные формулы справедливы, когда



$$\frac{s-c}{D_R} \leq 0,05, \quad (6)$$

при наличии подкладного листа

$$g \geq 0,2h_1; \quad b_2 \geq 0,6b_3; \quad b_3 \leq 1,5h_1; \quad s_2 \geq s, \quad (7)$$

где  $s_2$  – толщина подкладного листа.

Геометрические характеристики опорных лап, необходимые для расчетов, приведены на рис. 2. Усилие, действующее на опорную лапу, определяется по формуле

$$F_1 = \begin{cases} \frac{G}{2} + \frac{M}{D_R + 2(e_1 + s + s_2)} & \text{при } n = 2; n = 4; \\ \frac{G}{3} + \frac{M}{0,866[D_R + 2(e_1 + s + s_2)]} & \text{при } n = 3. \end{cases} \quad (8)$$

Если неизвестна величина  $e_1$ , то ее принимают

$$e_1 = \frac{5}{6}l_1. \quad (9)$$

При наличии момента  $M$  допускается устанавливать аппарат на две опорные лапы при условии, что момент будет действовать в плоскости опор.

Проверку несущей способности обечайки в месте приварки опорной лапы осуществляют по формуле

$$F_1 \leq [F_1] = \frac{[\sigma_i] h_1 (s-c)^2}{K_7 e_1}. \quad (10)$$

При  $\frac{g}{h_1} < 0,5$  значение  $[F_1]$ , полученное по формуле, необходимо умножить на величину  $\left(0,5 + \frac{g}{h_1}\right)$ .

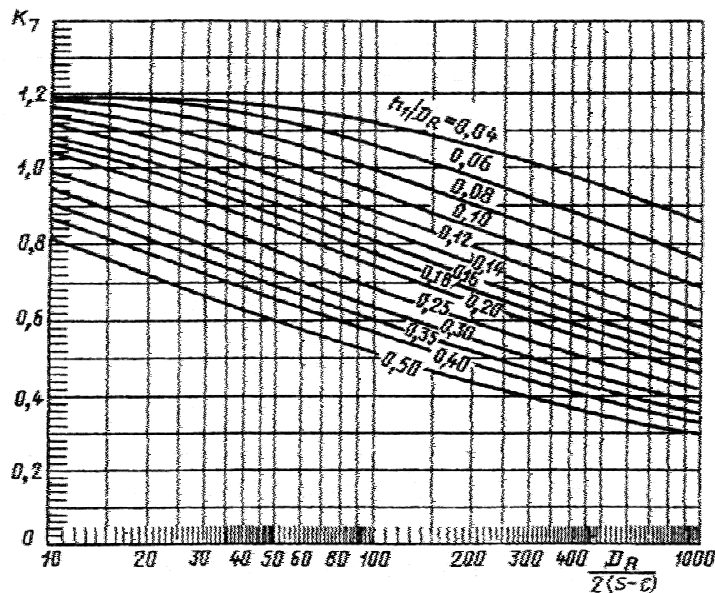


Рис. 3 Номограмма для определения коэффициента  $K_7$

Величину  $[\sigma_i]$  рассчитывают по формуле (1), в которой коэффициент  $K_1$  вычисляют при  $\vartheta_1 = 0,3$  и  $\vartheta_2$ , найденным по формуле (3). В формуле (3) величину  $\bar{\sigma}_m = \bar{\sigma}_{mx}$  рассчитывают по формуле (4) для цилиндрической обечайки.

Несущую способность обечайки в месте приварки опорной лапы с подкладным листом следует проверять по формуле

$$F_1 \leq [F]_1 = \frac{[\sigma_i] b_3 (s-c)^2}{K_8 (e_1 + s_2)}. \quad (11)$$

При  $\frac{b_2}{b_3} < 0,6$  значение  $[F]_1$ , полученное по формуле, необходимо умножить на  $\left(0,4 + \frac{b_2}{b_3}\right)$ .

Коэффициент  $K_8$  определяют в соответствии с рис. 4.

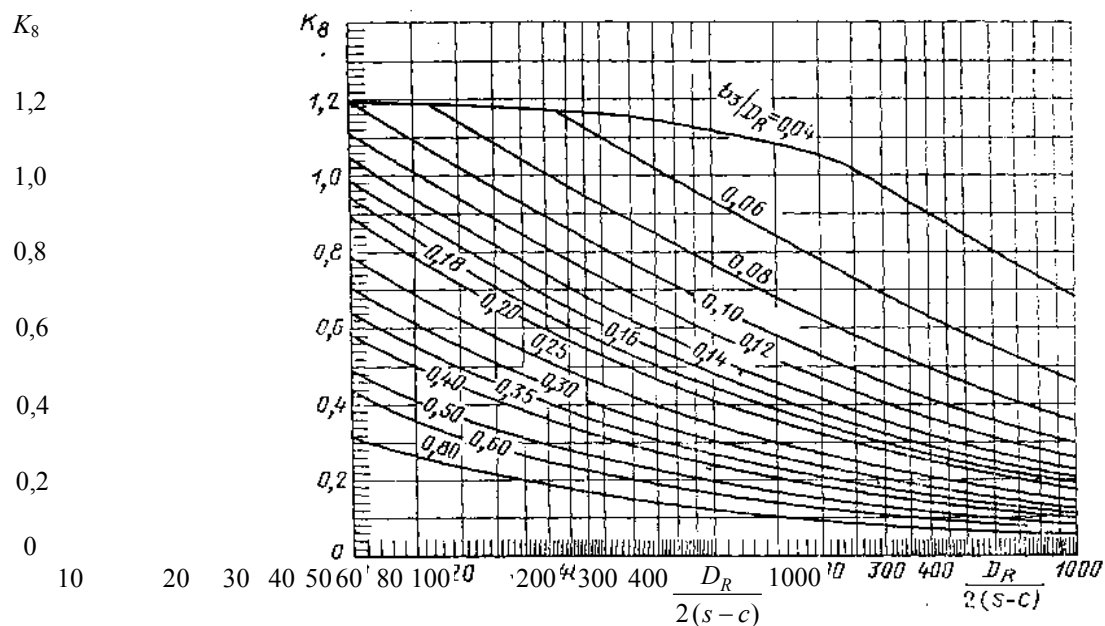


Рис. 4 Номограмма для определения коэффициента  $K_8$

## 2 ОПОРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Для горизонтальных аппаратов опоры, как правило, делают сварными, реже литыми или из бетона или кирпича. Число опор обычно две, но при значительной длине аппарата ставят большее количество. Желательно расстояние между опорами делать не более 8...10 м. Для того чтобы уменьшить изгибные напряжения в стенках аппарата, угол дуги опирания горизонтальной опоры желательно делать не менее  $120^\circ$ .

Аппараты во время эксплуатации нагреваются и удлиняются. Если не обеспечить возможность температурного удлинения, то в стенках может возникнуть большое напряжение. Для уменьшения температурных напряжений одну опору делают неподвижной, а другие – подвижными, обеспечивающими свободное перемещение аппарата относительно несущей конструкции.

Расстояние между неподвижной и подвижной опорами выбирается так, чтобы температурные удлинения аппарата между смежными опорами не превышали 35 мм, опора перемещается по плоскому подкладному листу, который перед установкой аппарата смазывается графитовой смазкой. Регулировочные болты, предусмотренные в стандартных седловых опорах, допускают нагрузку на одну опору (при незаполненном аппарате) не более 160 кН. После выверки аппарата на фундаменте и затвердения бетонной подливки регулировочные болты и болты, предназначенные для крепления подкладного листа к опоре на время установки аппарата на фундамент, удаляются. В скользящих опорах отверстия под фундаментные болты делают овальными. Фундаментные болты должны быть снабжены контргайками и не затягиваться сильно (устанавливаться с зазором 1...2 мм). Расположение фундаментных болтов в

опорах должно обеспечивать свободное перемещение их вследствие температурного удлинения. Если удлинения от действия температуры велики, то устанавливают катучие опоры. Эти опоры имеют ролики или катки, помещенные между опорой аппарата и опорной плитой несущей конструкции.

Седловые опоры выбираются по ОСТ 26-1265-75 по нагрузке и диаметру.

Типы 2 и 3 (рис. 5) предназначены для диаметров с  $D_H = 800 \dots 4000$  мм. Основные характеристики представлены в табл. 4.

Опорный лист (табл. 5) по ОСТ 26-1267-76 выбирается в зависимости от диаметра аппарата и приваривается прерывистым сварным швом. Если корпус аппарата подлежит термообработке, приварка опорного места осуществляется до термообработки, а опора к корпусу приваривается после нее. Сварка деталей седловых опор между собой выполняется сплошными односторонними угловыми или тавровыми швами, а опоры прерывистыми двухсторонними угловыми швами. Приварка опоры сплошным односторонним угловым швом без опорного листа непосредственно к корпусу аппарата допускается только для опоры типа I.

При расчете горизонтального аппарата, установленного на седловых опорах, его рассматривают как балку, лежащую на опорах и нагруженную равномерной распределенной нагрузкой. Расчет ведут по РТМ 26-110-77, ГОСТ 26202-84. При расчете определяют изгибающие моменты в середине аппарата и под опорой.

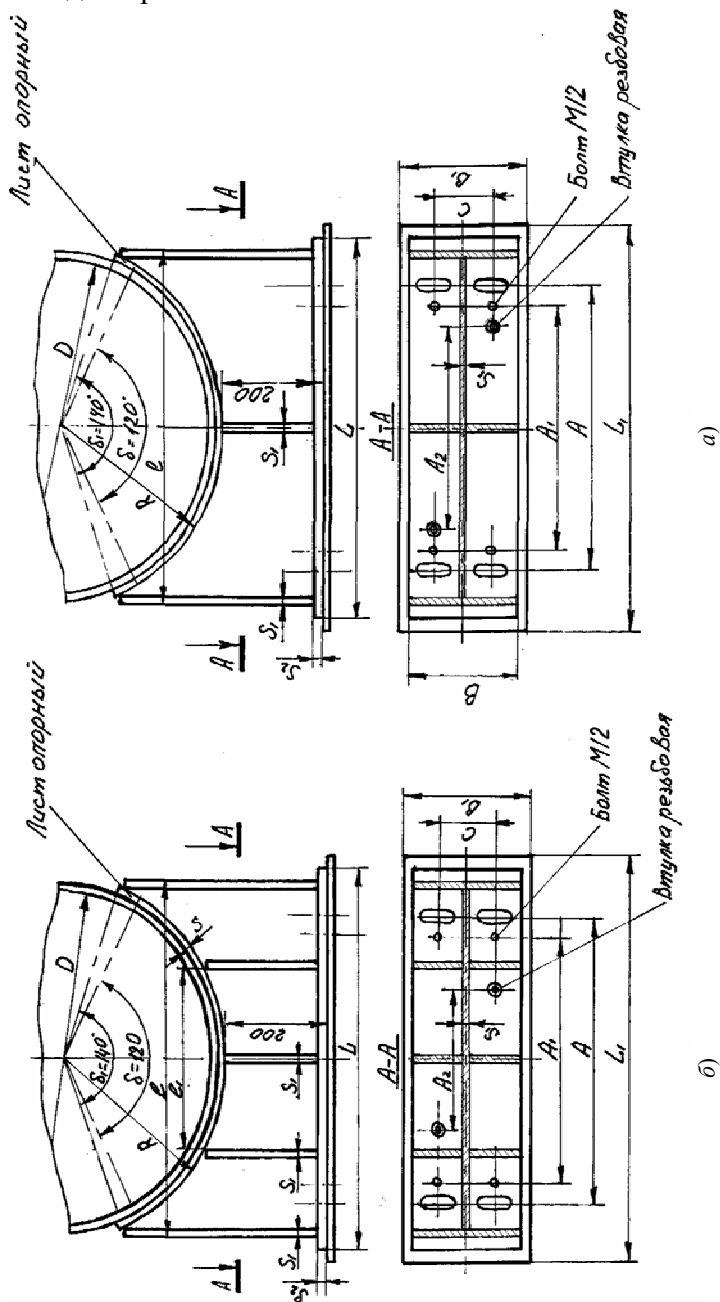


Рис. 5 Конструкции стандартных седловых опор под стальные сварные горизонтальные цилиндрические аппараты:  
а — тип 2, б — тип 3

D	Q, кН		s <sub>1</sub>		s <sub>2</sub>		R	L	l <sub>1</sub>	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
	Исполнение											
	1	2	1	2	1	2						
800	80	160	8	14	14	18	414, 422, 432, 442	740	–	50	400	250
100 0	125	200	8	14	14	18	514, 522, 532, 546	100 0	–	650	550	400
120 0	125	200	8	12	14	18	614, 622, 630, 638	110 0	–	800	700	550
140 0	160	250	8	12	14	20	714, 722, 732, 744	125 0	–	950	850	700
160 0	160	300	8	12	14	20	814, 822, 832	142 0	–	110 0	100 0	850
180 0	160	300	8	12	14	20	914, 922, 930, 936	160 0	–	110 0	100 0	850
200 0	250	400	8	12	16	20	1014, 1022, 1032, 1042	177 0	–	150 0	140 0	125 0
220 0	250	500	8	14	14	20	1116, 1124, 1132, 1146	194 0	940	150 0	130 0	750
240 0	400	630	10	18	18	22	1216, 1224, 1232, 1246	212 0	105 0	180 0	160 0	750
260 0	400	750	10	18	18	22	1316, 1324, 1332, 1346	229 0	110 0	180 0	160 0	750
280 0	400	750	10	18	18	22	1416, 1422, 1432, 1446	246 0	120 0	220 0	200 0	100 0
300 0	630	900	14	18	20	22	1520, 1528, 1540	264 0	130 0	220 0	200 0	100 0
320 0	630	900	14	18	20	22	1620, 1628, 1634, 1640	281 0	136 0	220 0	200 0	120 0
340 0	630	140 0	12	24	20	26	1720, 1726, 1732, 1740	299 0	147 0	239 0	219 0	120 0
360 0	630	140 0	12	24	18	26	1820, 1828, 1834	316 0	157 0	280 0	260 0	140 0
380 0	630	140 0	12	22	18	24	1920, 1928, 1934	333 0	165 0	280 0	260 0	140 0
400	630	140	12	20	18	24	2020,	351	174	280	260	140

0		0				2028, 2034	0	0	0	0	0
---	--	---	--	--	--	---------------	---	---	---	---	---

Пр и м е ч а н и е:

- 1 Для всех опор  $l = L - 20$  мм.
- 2 Ширина опоры:  $D \leq 1400$  мм  $B = 250$  мм; для  $D \geq 1600$  мм  $B = 300$  мм.
- 3 Размеры опорной плиты  $L_1 = L + 20$  мм;  $B_1 = B + 20$  мм.
- 4 Втулки резьбовые для всех опор имеют диаметр  $d = M48$ .
- 5 Ширину опорного листа  $B_2$  см. в табл. 5.
- 6 Расстояние между болтами для  $D \leq 1400$  мм  $C = 140$  мм; для  $D \geq 1600$  мм  $C = 200$  мм.

Условное обозначение опоры типа 2 исполнения 2 с  $Q = 200$  кН, радиусом  $R = 630$  мм без опорного листа: Опора 200-630-2-1 ОСТ 26-1265-75.

### 5 Опорные листы к седловым опорам

$D$	$R$	$s$	$B_2$	$D$	$R$	$s$	$B_2$
800	414	10, 8, 6	36 0	260 0	131	10, 8, 6 12, 10, 8, 6 14, 12, 10, 8, 6 20, 18, 16, 14, 10	45 0
	422	12, 10, 8, 6			132		
	432	14, 12, 10, 8,			4		
	442	6			133		
		14, 12, 10, 6			2		
					134		
					6		
100 0	514	10, 8, 6	36 0	280 0	141	10, 8, 6 12, 10, 8, 6 14, 12, 10, 8 20, 18, 16, 14, 10	45 0
	522	12, 10, 8, 6			142		
	532	14, 12, 10, 8,			4		
	546	6			143		
		18, 16, 14, 10, 6			2		
					144		
					6		
120 0	614	10, 8, 6	36 0	300 0	152	12, 10, 8 14, 12, 10, 8 18, 16, 14, 12, 10	50 0
	622	12, 10, 8, 6			0		
	630	12, 10, 8, 6			152		
	638	12, 10, 8			8		
					154		
					0		
140 0	714	10, 8, 6	40 0	320 0	162	12, 10, 8 14, 12, 10 14, 12, 10 14, 12, 10	50 0
	722	12, 10, 8, 6			0		
	732	14, 12, 10, 8,			162		
	744	6			8		
		16, 14, 12, 8			163		
					4		
					164		
					0		
160 0	814	10, 8, 6	40 0	340 0	172	12, 10, 8	50 0
	822	12, 10, 8, 6			0	12, 10, 8	
	832	14, 12, 10, 8,			172	12, 10, 8	

		6			6 173 2 174 0	14, 12, 10	
180 0	914 922 930 936	10, 8, 6 12, 10, 8, 6 12, 10, 8 12, 10, 8	40 0	360 0	182 0 182 8 183 4	12, 10, 8 14, 12, 10 14, 12, 10	54 0
200 0	101 4 102 2 103 2 104 2	10, 8, 6 12, 10, 8, 6 14, 12, 10, 8, 6 14, 12, 10, 6	45 0	380 0	192 0 192 8 193 4	12, 10, 8 14, 12, 10 14, 12, 10	54 0
220 0	111 6 112 4 113 2 114 6	10, 8, 6 12, 10, 8 14, 12, 10, 8 20, 18, 16, 14, 10	45 0	400 0	202 0 202 8 203 4	12, 10, 8 14, 12, 10 14, 12, 10	54 0
240 0	121 6 122 4 123 2 124 6	10, 8, 6 12, 10, 8, 6 14, 12, 10, 8 20, 18, 16, 14, 10	45 0				

Условное обозначение опорного листа толщиной  $s = 12$  мм, радиусом  $R = 722$  мм: Лист опорный 12-722 ОСТ 26-1267-75.

## 2.1 РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АППАРАТОВ В МЕСТЕ УСТАНОВКИ СЕДЛОВЫХ ОПОР (см. рис. 6 и 7)

Расчетные формулы применимы, когда

$$60^\circ \leq \delta_1 \leq 180^\circ, \quad (12)$$

$$\frac{s-c}{D} \leq 0,05 \quad (13)$$

при наличии подкладных листов

$$s_2 \leq s, \quad f \geq 0,1D. \quad (14)$$

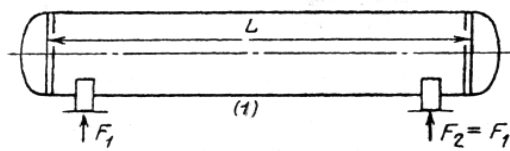


Рис. 6 Аппарат, опирающийся симметрично на две седловые опоры

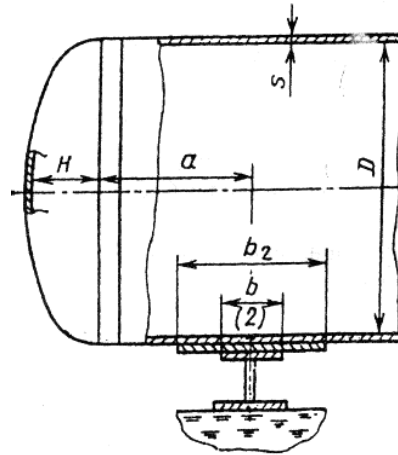


Рис. 7 Цилиндрическая обечайка, не подкреплённая элементами жесткости

В качестве основной расчетной схемы (рис. 8) для определения усилий, моментов и поперечных усилий принимают балку кольцевого сечения, шарнирно опёртую в местах расположения опор.

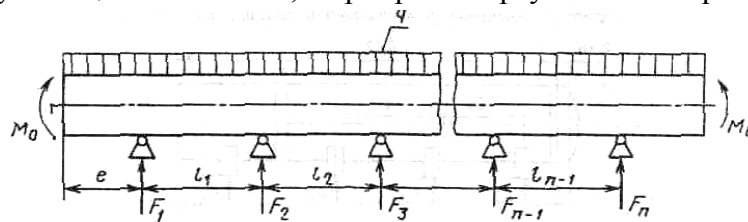


Рис. 8 Основная расчетная схема

Нагрузки балки определяются по формулам:

$$q = \frac{G}{L + \frac{4}{3}H}, \quad (15)$$

где  $G$  – вес аппарата в условиях эксплуатации или испытания (монтажа);  $L$ ,  $H$  – соответственно, длина цилиндрической части аппарата, включая длину цилиндрической отбортовки днища, высота выпуклой части днища;

$$M_0 = q \frac{D^2}{16}. \quad (16)$$

Опорное усилие

$$F_i = \psi_i \frac{G}{n}, \quad (17)$$

$n$  – количество опор для  $n = 2$ ,  $\psi = 1$ .

Изгибающие моменты  $M_1$  следует определять в сечениях обечайки над опорами, а моменты  $M_{12}$  – в сечениях между опорами, где они имеют максимальное значение.

Момент  $M_i$  над  $i$ -й опорой

$$M_1 = M_2 = \frac{qe^2}{2} - M_0; \quad e = a + \frac{2}{3}H; \quad a = 0,2D. \quad (18)$$

Максимальный момент между опорами

$$M_{12} = M_0 + F_1 \left( \frac{L}{2} - a \right) - \frac{q}{2} \left( \frac{L}{2} + \frac{4}{3} H \right)^2. \quad (19)$$

Расчет  $M_{12}$  следует производить, если

$$\max \{ M_{12} \} > \max \{ M_1, M_2 \}. \quad (20)$$

Поперечные усилия  $Q_1$  следует определять в сечении обечайки над опорами. Величина поперечных усилий определяется по зависимости

$$Q_1 = \frac{L - 2a}{L + \frac{4}{3}H} F_1. \quad (21)$$

## 2.2 ПРОВЕРКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОБЕЧАЙКИ В СЕЧЕНИИ МЕЖДУ ОПОРАМИ

### 2.2.1 Сосуды, работающие под внутренним избыточным давлением

Условие прочности

$$\frac{pD}{4(s-c)} + \frac{4M_{12}K_9}{\pi D^2(s-c)} \leq [\sigma] \varphi, \quad (22)$$

где  $M_{12}$  – изгибающий момент, определяется по формуле (19);  $K_9$  – коэффициент, учитывающий частичное заполнение жидкостью, определяется по рис. 9.

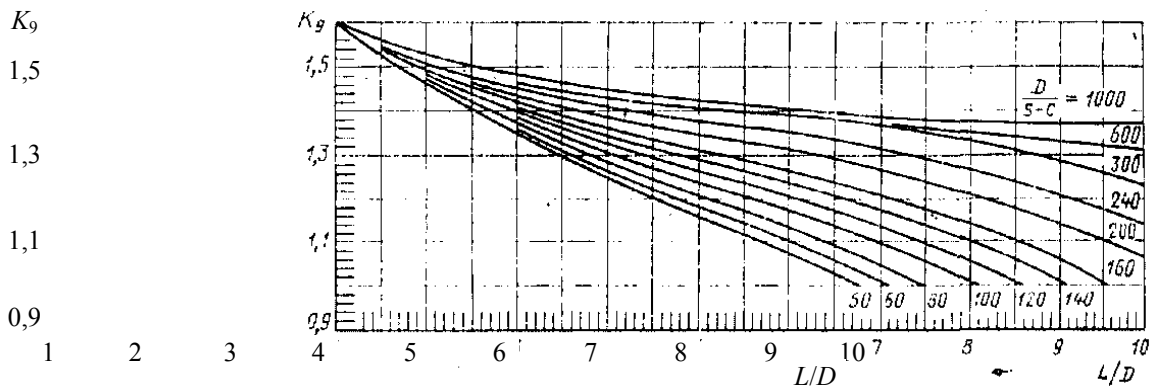


Рис. 9 Номограмма для определения коэффициента  $K_9$

Условие устойчивости

$$\frac{[M_{12}]}{[M]} \leq 1,0. \quad (23)$$

### 2.2.2 Сосуды, работающие под наружным давлением

Условие устойчивости

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{M_{12}}{[M]} \leq 1,0. \quad (24)$$



Значения допускаемых величин определяются по ГОСТ 14249–89.

### 2.3 ПРОВЕРКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОБОЛОЧКИ, НЕ УКРЕПЛЕННОЙ КОЛЬЦАМИ ЖЕСТКОСТИ, В ОБЛАСТИ ОПОРНОГО УЗЛА

Параметры системы, определяемые:

- расстоянием до днища

$$\gamma = 2,83 \frac{a}{D} \sqrt{\frac{s-c}{D}};$$

- шириной пояса опоры

$$\beta = 0,91 \frac{b}{\sqrt{D(s-c)}}.$$

#### 2.3.1 Цилиндрические обечайки без подкладных листов

Условие жесткости

$$F_i \leq \min \{ [F]_2, [F]_3 \}, \quad (29)$$

где  $[F]_2$  – допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении;  $[F]_3$  – допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении;

$$[F]_2 = \frac{0,7[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s-c)} (s-c)}{K_{10} K_{12}}; \quad (30)$$

$$[F]_3 = \frac{0,9[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s-c)} (s-c)}{K_{14} K_{16} K_{17}}, \quad (31)$$

где  $[\sigma_i]_2$  и  $[\sigma_i]_3$  – предельные напряжения изгиба;  $K_{10}$ ,  $K_{11}$ ,  $K_{17}$  – коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры;  $K_{12}$ ,  $K_{14}$  – коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата;  $K_{16}$  – коэффициент, учитывающий влияние расстояния до днища.

$$K_{10} = \max \left\{ \frac{e^{-\beta} \sin \beta}{\beta}; 0,25 \right\}; \quad (32)$$

$$K_{11} = \frac{1 - e^{-\beta} \cos \beta}{\beta}; \quad (33)$$

$$K_{12} = \frac{1,15 - 0,1432\delta_1}{\sin(0,5\delta_1)}; \quad (34)$$

$$K_{13} = \frac{1,7 - 2,1\delta_1}{\sin(0,5\delta_1)}, \text{ если } K_{13} < 0, \text{ то принимают } K_{13} = 0; \quad (35)$$

$$K_{14} = \frac{1,45 - 0,43\delta_1}{\sin(0,5\delta_1)}; \quad (36)$$

$$K_{15} = \frac{0,8\sqrt{\gamma} + 6\gamma}{\delta_1}, \text{ если } K_{15} < 1, \text{ то принимают } K_{15} = 1; \quad (37)$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0,65}{1 + (6\gamma)^2} \sqrt{\frac{\pi}{3\delta_1}}; \quad (38)$$

$$K_{17} = \frac{1}{1 + 0,6 \sqrt{\frac{D}{s-c} \frac{b}{D}} \delta_1}. \quad (39)$$

Во все формулы  $\delta_1$  подставляется в радианах.

Общее осевое мембранное напряжение изгиба, действующее в области опорного узла:

$$\bar{\sigma}_{mx} = \frac{4M_i}{\pi D^2 (s-c)}, \quad (40)$$

где  $M_i$  – изгибающий момент, определяемый по формуле (18).

Предельное напряжение изгиба  $[\sigma_i]_{2,3}$  определяют по формуле (1), коэффициент  $K_1$  – по формуле (2) (см. табл. 6).

### 6 Значение величин $\upsilon_1, \upsilon_{2,1}$ и $\upsilon_{2,2}$

$[\sigma_i]_{2,3}$	$\upsilon_1$	$\upsilon_{2,1}$	$\upsilon_{2,2}$
$[\sigma_i]_2$	$-\frac{0,23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}}$	$-\bar{\sigma}_{mx} \frac{K_2}{n_T [\sigma]}$	$\left( \frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{mx} \right) \frac{K_2}{n_T [\sigma]}$
$[\sigma_i]_3$	$-\frac{0,53 \cdot K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0,5\delta_1)}$	0	$\frac{pD}{2(s-c)} \frac{K_2}{n_T [\sigma]}$

Проверку устойчивости обечайки следует проводить по формуле

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{M_1}{[M]} + \frac{F_e}{[F]} + \left( \frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1,0, \quad (41)$$

где  $p = 0$  для аппаратов, работающих под внутренним избыточным давлением;  $F_e$  – эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений, действующих в области опоры, определяется по формуле

$$F_e = F_i \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{D}{(s-c)}} K_{13} K_{15}, \quad (42)$$

где  $K_{13}$  – коэффициент, учитывающий влияние угла охвата;  $K_{15}$  – коэффициент, учитывающий влияние расстояния до днища.

### 2.3.2 Цилиндрические обечайки с подкладным листом

При выполнении условия

$$b_2 \geq K_{19} D + 1,5b, \quad (43)$$

где

$$K_{19} = \frac{5}{6\sqrt[3]{\frac{D}{(s-c)}\delta_1}},$$

прочность обечайки проверяется по формуле

$$F_i \leq 1,5 \min \{ [F]_2, [F]_3 \}. \quad (44)$$

Если условие не выполняется, то расчет ведется аналогично расчету для цилиндрической обечайки без подкладных листов. При этом подкладной лист рассматривают как седловую опору шириной  $b_2$  с углом обхвата  $\delta_2$ .

Подкладной лист рассматривают как усиление стенки сосуда, во всех формулах вместо  $s$  следует подставлять

$$s_{ef} = (s-c) \sqrt{1 + \left( \frac{s_2}{s-c} \right)^2} \quad (45)$$

устойчивость проверяют по формуле (38).

## 2.4 РАСЧЕТ СЕДЛОВОЙ ОПОРЫ

На опору действуют вертикальная сила  $F_1$  (реакция опоры), горизонтальная сила  $P_1$  (перпендикулярная к оси аппарата) и горизонтальная сила трения  $P_2$  (параллельная оси аппарата).

Реакция опоры

$$F_{1\max} = 0,5G_{\max}. \quad (46)$$

Горизонтальная сила  $P_1$  (перпендикулярная к оси аппарата), табл. 7:

$$P_1 = K_{18}F_{1\max}. \quad (47)$$

Горизонтальная сила трения  $P_2$  (параллельная оси аппарата)

$$P_2 = 0,15F_{1\max}, \quad (48)$$

где 0,15 – коэффициент трения между аппаратом и опорой (или между опорой и опорной плитой).

**Таблица 7**

$\delta$	60	80	100	120	140	160	180
$K_{18}$	0,1	0,15	0,18	0,22	0,24	0,28	0,32

Площадь опорной плиты принимается конструктивно и должна удовлетворять условию (табл. 8)

$$F_n \geq F_{nR} = \frac{F_1}{[\sigma_{бет}]}. \quad (49)$$

**Таблица 8**

Марка бетона	500	300	200
$[\sigma_{бет}]$ , МПа	10	8	6

Действительное напряжение сжатия бетона определяют по формуле

$$\sigma_{\text{бет}} = [\sigma_{\text{бет}}] \frac{F_{\text{пР}}}{F_{\text{п}}} . \quad (50)$$

Расчетная толщина опорной плиты (табл. 9)

$$s_{\text{пР}} = 2,45b \sqrt{\frac{K_{19} \sigma_{\text{бет}}}{1,1[\sigma]}} , \quad (51)$$

где  $K_{19}$  – коэффициент, определяемый в зависимости от соотношения  $a/b$ ;  $b$  – ширина поперечных ребер;  $a$  – расстояние между поперечными ребрами;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение для материала опорной плиты.

Таблица 9

$\frac{b}{a}$	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,6 5	0,7	1	2	3
$K_{19}$	0,5	0,4 5	0,4	0,3 5	0,3	0,2 5	0,2	0,1 2	0,12 5	0,1 2

Исполнительная толщина опорной плиты

$$s_{\text{п}} = s_{\text{пР}} + c \quad (52)$$

во всех случаях  $s_{\text{п}} \geq 10$  мм.

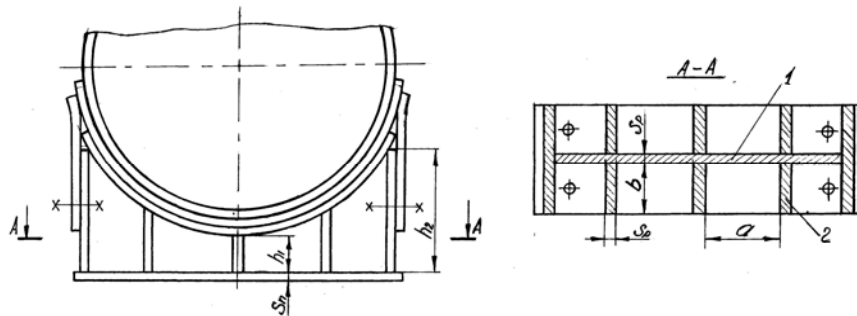


Рис. 10 Конструктивные элементы седловой опоры

Расчетная толщина ребра 1 из условия прочности на изгиб и растяжение определяется по формуле

$$s_1 \geq s_{\text{пР}} = \frac{42P_1}{1,1[\sigma] D} . \quad (53)$$

Толщины ребер 1 и 2 проверяют на устойчивость от действия сжимающей нагрузки  $q$ . Нагрузка на единицу длины ребра

$$q = 1,2 \frac{F_{1\text{max}}}{l_{\text{общ}}} ; \quad (54)$$

здесь  $l_{\text{общ}}$  – общая длина всех ребер на опоре:

$$l_{\text{общ}} = a(m-1) + 2bm , \quad (55)$$

где  $m$  – число ребер на опоре.

Расчетная толщина ребер из условия устойчивости

$$s_{\text{пР}} \geq \left[ \frac{q}{\sigma_{\text{кр}}} \right] , \quad (56)$$

где  $[\sigma_{\text{кр}}]$  – допускаемое напряжение на устойчивость, принимаемое из условия

$$[\sigma_{\text{кр}}] = \frac{\sigma_{\text{т}}}{3} . \quad (57)$$

Условие прочности опоры при действии изгибающей силы  $P_2$

$$\sigma = \frac{P_2 h_1}{W} \leq \varphi [\sigma], \quad (58)$$

в случае приварной опоры

$$\sigma = \frac{0,5P_2(h_1 + h_2)}{W} \leq \varphi [\sigma], \quad (59)$$

где  $W$  – момент сопротивления горизонтального сечения по ребрам у основания опоры;  $h_1$  и  $h_2$  – высоты ребер опоры.

### 3 РАСЧЕТ ДНИЩ АППАРАТОВ В МЕСТЕ УСТАНОВКИ ОПОРНЫХ СТОЕК

Наклонные опорные обечайки рассчитывают, если исключено перемещение стоек по днищу и соблюдается условие  $d_3 \leq 1,6d_2$ .

К эллиптическим днищам опорные стойки должны быть прикреплены в области  $0 < x < 0,4D$ , а к тороидическим – в области сферического сегмента. Характерные размеры для расчетных моделей приведены на рис. 11.

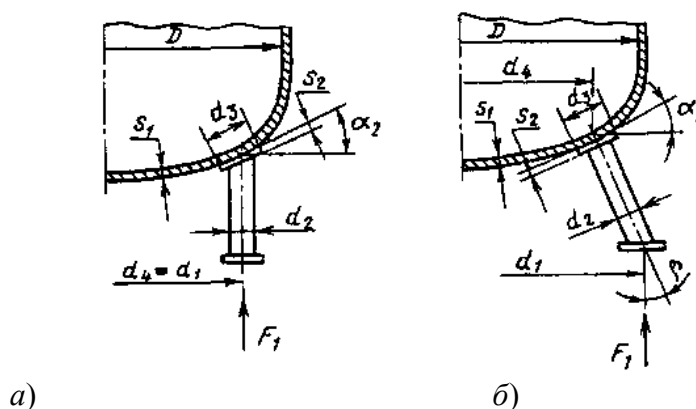


Рис. 11 Характерные размеры для расчетных моделей опорных стоек:  
а – вертикальная; б – наклонная

Вертикальное усилие, действующее на опорную стойку, определяют по формуле

$$F_1 = \begin{cases} \frac{G}{2} + \frac{M}{D_R + 2(e_1 + s + s_2)}, & \text{при } n = 2; n = 4; \\ \frac{G}{3} + \frac{M}{0,866[D_R + 2(e_1 + s + s_2)]}, & \text{при } n = 3. \end{cases} \quad (60)$$

За счет точности монтажа достигается равномерное распределение нагрузки между всеми четырьмя опорными стойками, усилие будет определяться по зависимости

$$F_1 = \frac{G}{3} + \frac{M}{d_4}, \quad \text{для } n = 4. \quad (61)$$

Действие момента  $M$  учитывается только в том случае, если опорные стойки связаны между собой жесткой рамой, препятствующей взаимному перемещению стоек. При этом должны быть выполнены условия:

$$\frac{G}{3} > \frac{M}{0,866d_4}, \quad \text{для } n = 3; \quad (62)$$

$$\frac{G}{4} > \frac{M}{d_4}, \quad \text{для } n = 4. \quad (63)$$

Несущая способность выпуклого днища должна удовлетворять следующим условиям:

$$\frac{F_1 - p \frac{\pi d_e^2}{4}}{[F]_1} + \frac{p}{[p]_1} \leq 1,0; \quad (64)$$

$$\frac{F}{[F]_1} \leq 1,0, \quad (65)$$

где  $[F]_1$  – допускаемое вертикальное усилие;  $d_e$  – эффективный диаметр опорной стойки;  $d_e = d_2$  для опорных стоек без подкладного листа;  $d_e = d_3$  для опорных стоек с подкладным листом;  $[p]_1$  – допускаемое внутреннее избыточное давление в срединной области выпуклого днища, по ГОСТ 14249–89.

Величина допускаемого вертикального усилия определяется по формуле

$$[F]_1 = 1,57 [\sigma] (s_1 - c)^2 \frac{\cos \beta}{\cos(\alpha_2 - \beta)} \sqrt{1 + 5 \frac{d_e^2}{r_m (s_1 - c)}}, \quad (66)$$

где  $r_m$  и  $\alpha_2$  для эллиптического днища:

$$r_m = \frac{2D \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}{1 + \frac{1}{\frac{3}{4} \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}; \quad (67)$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{d_4}{2D \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}. \quad (68)$$

Метод расчета применим для аппаратов, работающих под внутренним избыточным давлением.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1989. 62 с.
- ОСТ 26-665–79 Сосуды и аппараты. Опоры (лапы) и стойки для вертикальных аппаратов. Конструкции и типоразмеры. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1975. 14 с.
- ОСТ 26-1265–75. Сосуды и аппараты. Опоры седловые. Конструкции и типоразмеры. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1975. 14 с.
- РТМ 26-110–77. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет горизонтальных аппаратов, установленных на седловых опорах. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1977. 25 с.
- ГОСТ 26202–84. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1984. 35 с.

#### 1 Опоры (лапы) для вертикальных аппаратов типов 1 и 2, ОСТ 26-665–79

$Q$	Тип опоры	$a$	$a_1$	$a_2$	$b$	$b_1$	$b_2$	$c$	$c_1$	$h$	$h_1$	$s_1$	$k$	$k_1$	$d$	$d_6$	$f_{max}$
1,6	1	45	65	–	60	–	–	15	40	85	8	4	10	15	12	M1	10
	2			40	50	45	120			25				2			40
4,0	1	75	95	–	95	–	–	20	50	140	10	5	15	25	12	M1	25
	2			60	70	65	190			40				6			80
10	1	90	115	–	115	–	–	20	85	170	14	6	20	30	24	M2	30
	2			80	85	80	235			50				0			–
25	1	125	155	–	155	–	–	45	90	230	16	8	25	40	24	M2	40
	2			100	120	115	310			65				4			14
40	1	150	190	–	185	–	–	45	90	295	20	10	30	60	35	M3	50
	2			120	150	140	390			80				0			16

63	1 2	185	230	– 150	230 380	– 170	– 160	60	13 0	360 470	24	12	35	70 100	35	МЗ 6	60 21 0
10 0	1 2	250	310	– 200	310 520	– 230	– 220	65	16 0	475 620	30	16	40	95 130	42	–	80 28 0
16 0	1 2	300	380	– 250	390 650	– 290	– 280	65	20 0	585 780	36	20	60	115 180	42	–	10 0 35 0
25 0	1 2	360	455	– 300	480 800	– 360	– 350	65	24 0	695 940	40	24	75	135 220	42	–	12 0 43 5
40 0	1 2	430	540	– 375	520 890	– 420	– 410	70	28 0	810 1100	45	30	85	150 255	50	–	14 5 41 0
63 0	1 2	540	690	– 460	680 1150	– 550	– 540	80	40 0	1100 1420	55	40	110	170 280	50	–	18 0 60 0

П р и м е ч а н и е: величина зазора между аппаратом и подпорной рамой принимается конструктивно, но не больше  $f_{\max}$ .