

## ГЛАВА 20

## ОПОРЫ АППАРАТОВ

## 20.1. Конструкции

Установка технологических аппаратов на фундаменты или специальные несущие конструкции осуществляется большей частью с помощью опор. Непосредственно на фундаменты устанавливаются лишь аппараты с плоским днищем, предназначенные главным образом для работы под наливом.

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

Вертикальные аппараты обычно устанавливаются или на стойках, когда их размещают внизу помещения, или на подвесных лапах, когда аппарат размещают между перекрытиями в помещении или на специальных стальных конструкциях.

Аппараты с соотношением высоты к диаметру

$H/D > 5$ , размещаемые на открытой площадке, устанавливают на так называемых юбочных (цилиндрических и конических) опорах.

Горизонтальные аппараты независимо от их размещения (в помещении или на открытой площадке) устанавливают на седловых опорах.

Все указанные опоры для стальных сварных аппаратов стандартизированы.

Конструкции стандартных опор для вертикальных аппаратов приведены на рис. 20.1, а их основные характеристики — в табл. 20.1—20.4. Тип 1 (лапы) служит для аппаратов без теплоизоляции, тип 2 (лапы) — для аппаратов с теплоизоляцией, тип 3 (стойки) — для аппаратов с эллиптическими и коническими (с углом при вершине конуса  $2\alpha \leq 120^\circ$ )

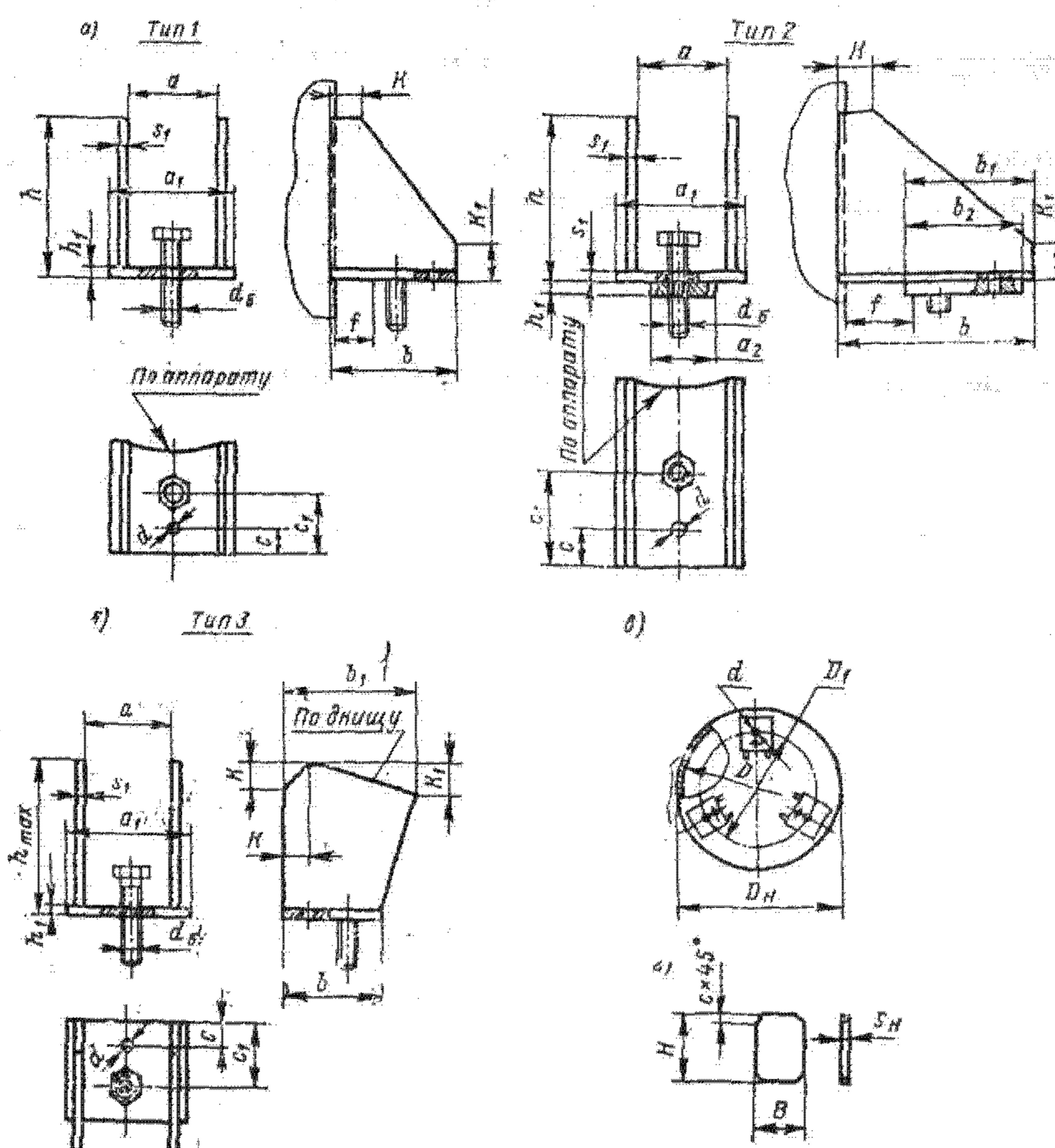


Рис. 20.1. Конструкции стандартных опор (лап и стоек) для стальных сварных вертикальных цилиндрических аппаратов: *a* — типы 1 и 2 (лапы); *b* — тип 3 (стойки); *c* — схема расположения опор на днище аппарата; *d* — накладной лист

дниками. В зависимости от толщины стенки корпуса аппарата лапы привариваются или непосредственно к корпусу, или к накладному листу.

Материал деталей этих опор выбирается из условий эксплуатации. Накладной лист приваривается к корпусу аппарата сплошным швом. Если опоры выполнены из углеродистой стали, а аппарат — из коррозионностойкой стали, накладные листы должны выполняться из стали той же марки, что и корпус аппарата.

Число опор определяется расчетом и конструк-

тивными соображениями: лап должно быть не менее двух, стоек — не менее трех.

На рис. 20.2 приведены конструкции седловых опор, а их основные характеристики — в табл. 20.5 и 20.6. Тип 1 предназначен для аппаратов с наружным диаметром  $D_H = 159 - 630$  мм (исполнение 1 — с одним отверстием под фундаментный болт; исполнение 2 — с двумя овальными отверстиями под фундаментные болты), тип 2 для аппаратов с  $D = 800 - 2000$  мм (исполнение 1 — с допускаемой нагрузкой на опору  $Q = 80 - 250$  кН; исполнение 2 —  $Q = 160 - 400$  кН); тип 3 для аппаратов с

Таблица 20.1

Опоры (ланы) для вертикальных аппаратов (рис. 14.1, а, типы I и 2), ОСТ 26-665-79, мм

$Q, \text{кН}$	Тип опоры	$a$	$a_1$	$a_2$	$b$	$b_1$	$b_2$	$c$	$c_1$	$h$	$h_1$	$K$	$K_1$	$d$	$d_b$	$f_{max}$	
1,6	1	45	65	—	60	—	—	15	40	85	8	4	10	15	25	M12 M16 M20 M24	
	2	75	95	60	100	50	45	20	50	140	10	5	15	25	40	80	
4,0	1	90	115	—	115	—	—	—	85	170	14	6	20	30	50	24	M16 M20 M24
	2	80	195	80	195	85	80	—	—	230	16	8	25	40	40	140	
10,0	1	125	155	100	255	120	115	—	—	310	310	—	—	—	—	—	M16 M20 M24
	2	125	155	100	255	120	115	—	—	90	295	20	10	30	60	80	
25,0	1	150	190	120	315	150	140	—	—	390	390	—	—	—	—	—	M24 M30
	2	150	190	120	315	150	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
40,0	1	185	230	150	380	170	160	—	—	60	130	360	24	12	35	70	M30 M36
	2	230	—	—	—	—	—	—	—	—	470	—	—	—	—	—	
63,0	1	250	310	200	520	230	220	—	—	160	475	30	16	40	95	130	M36 M36
	2	250	310	200	520	230	220	—	—	65	200	585	36	20	60	115	
100,0	1	300	380	250	650	290	280	—	—	—	780	695	40	24	75	135	M36 M36
	2	300	380	250	650	290	280	—	—	—	—	940	—	—	—	—	
160,0	1	360	455	300	720	480	420	—	—	520	800	350	200	20	60	180	M36 M36
	2	360	455	300	720	480	420	—	—	520	890	420	410	70	280	1100	
250,0	1	430	540	375	890	520	470	—	—	520	890	420	410	70	280	810	M36 M36
	2	430	540	375	890	520	470	—	—	520	890	420	410	70	280	1100	
400,0	1	540	690	460	1150	680	550	—	—	680	1150	550	460	80	400	1100	M36 M36
	2	540	690	460	1150	680	550	—	—	680	1150	550	460	80	400	1100	
630,0	1	540	690	460	1150	680	550	—	—	680	1150	550	460	80	400	1100	M36 M36
	2	540	690	460	1150	680	550	—	—	680	1150	550	460	80	400	1100	

Приложение. Величина зазора между аппаратом и подпорной рамой  $f$  принимается, но не более  $f_{max}$ .  
Пример устоящего обозначения опоры типа 1 с допускаемой нагрузкой  $Q = 25$  кН:  
Опора 1-250 ОСТ 26-665-79.

$D = 2200 - 4000$  мм (исполнение 1 — с  $Q = 250 - 630$  кН; исполнение 2 —  $Q = 500 - 1400$  кН).

Скольжение опоры от температурных удлинений аппарата, устанавливаемого на бетонном фундаменте, должно происходить по опорному листу (ОСТ 26-1267—75), а для аппарата, устанавливаемого на металлоконструкции, — по листу, предусматриваемому в последней. Опорный лист (табл. 20.7) приваривается к аппарату прерывистым угло-

вым швом с катетом, равным меньшему из значений толщины корпуса или опорного листа. Если корпус аппарата подлежит термообработке, проварка опорного листа осуществляется до термообработки, а опора к корпусу приваривается после нее.

Материал седловых опор выбирается в зависимости от температуры рабочей среды, емкости аппарата и температуры самой ходовой пятидневки в месте его установки (табл. 20.8).

Таблица 20.2

**Накладные листы под опоры (лапы) типов 1 и 2 для вертикальных аппаратов (рис. 20.1, 2), ОСТ 26-665—79, мм**

$Q, \text{ кН}$	тип опоры	$B$	$H$	$c$	$s_n$	$Q, \text{ кН}$	тип опоры	$B$	$H$	$c$	$s_n$
1,6	1/2	75	120 155	8	4; 6; 8; 10	100,0	1/2	400	650 820	32	10; 12; 16; 20
4,0	1/2	125	200 255	10	6; 8; 10; 12	160,0	1/2	500	810 1020	40	12; 16; 20; 24
10,0	1/2	150	250 310	12		250,0	1/2	600	970 1230	48	16; 20; 24; 28
25,0	1/2	200	330 410	16	8; 10; 12; 16	400,0	1/2	700	1140 1440	50	
40,0	1/2	250	405 510	20		630,0	1/2	900	1480 1860	55	20; 24; 28
63,0	1/2	300	490 620	24	10; 12; 16; 20						

Примечания: 1. Размер  $s_n$  определяется расчетом и округляется до ближайшего большего значения по табл. 20.2, но должен быть не менее толщины обечайки. 2. Сторона накладного листа с размером  $B$  изгибается по наружному диаметру аппарата.

Пример условного обозначения накладного листа для опоры типа 1 с допускаемой нагрузкой  $Q = 25$  кН и толщиной 12 мм:

Накладной лист 1-2500-8 ОСТ 26-665-79.

Таблица 20.3

**Опоры (стойки) для вертикальных аппаратов (рис. 20.1, б, тип 3), ОСТ 26-665—79, мм**

$Q, \text{ кН}$	$a$	$a_1$	$b$	$b_1$	$c$	$r_1$	$h_{\max}$	$h_1$	$s_1$	$K$	$K_1$	$d$	$d_B$
4,0	75	110	85	120	22	30	220	10	6	6	60	19	M12
10,0	90	125	115	160	22	60	295	14	8	10	80	19	M16
25,0	125	165	140	200	22	80	365	16	10	10	105	24	M20
40,0	150	205	180	240	40	100	440	20	12	12	125	35	M24
63,0	185	245	210	280	40	120	515	24	14	15	150	35	M30
100,0	250	325	250	360	40	160	660	30	18	20	180	42	M36
160,0	300	390	340	480	60	200	875	36	24	25	250	42	—
250,0	360	480	490	680	60	240	1240	40	34	35	350	42	—

Примечание. Размеры  $b_1$  и  $K_1$  в опорах для конических днищ спиральные.

Пример условного обозначения опоры типа 3 с допускаемой нагрузкой  $Q = 63$  кН:

Опора 3-6300 ОСТ 26-665-79.

Таблица 20.4

Расположение фундаментальных болтов в плане для вертикальных аппаратов с опорами-стойками (рис. 20.1, а), ОСТ 26-665-79, мм

$D$	$D_1$								
219*	160	550	480	1100	1000	1800	1610	3000	2810
273*	215	600	520	1200	1100	1900	1710	3200	2960
325*	265	650	570	1300	1200	2000	1810	3400	3160
377*	320	700	620	1400	1260	2200	2010	3600	3360
400	340	800	720	1500	1360	2400	2210	3800	3560
450	390	900	820	1600	1410	2600	2410	4000	3760
500	430	1000	920	1700	1510	2800	2610	4500	4260
								5000	4760

Примечания: 1. На рис. 20.1, а показаны три опоры как возможный вариант исполнения. 2. Диаметры отверстия под фундаментные болты  $d$  — по табл. 20.3.

\* Наружный диаметр аппарата  $D_H$  (см. рис. 20.1, а), остальные диаметры внутренние.

Число седловых опор, располагаемых вдоль аппарата, определяется расчетом в зависимости от длины и массы аппарата и может быть равно двум и более. При этом одна опора должна быть неподвижной, остальные подвижными. Расстояние между неподвижной и подвижной опорами выбирается так, чтобы температурные удлинения аппарата между смежными опорами не превышали 35 мм.

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 затвердении бетонной подливки регулировочные болты и болты, предназначенные для крепления подкладного листа к опоре на время установки аппарата на фундамент, удаляются.

Сварка деталей седловых опор между собой выполняется сплошными односторонними угловыми или тавровыми швами, а опоры и опорного листа — прерывистым двусторонним угловым швом. Приварка опоры сплошным односторонним угловым швом

без опорного листа непосредственно к корпусу аппарата допускается только для опоры типа 1, при этом  $R = 0,5D_H$ .

Фундаментные болты у подвижной опоры должны быть снабжены контргайками и не затягиваться (устанавливаться с зазором 1—2 мм). Расположение фундаментных болтов в опорах должно обеспечивать свободное перемещение их вследствие температурного удлинения.

Конструкции стандартных опор для колонных аппаратов приведены на рис. 20.3 и 20.4, пределы применения стандартных опор в зависимости от диаметра колонны и минимальной приведенной нагрузки — в табл. 20.9, а основные размеры — в табл. 20.10—20.13.

Высота цилиндрических опор  $H$ , должна быть не менее 600 мм и выбирается по условиям эксплуатации аппарата.

Материал деталей опор должен выбираться исходя из условий эксплуатации и в соответствии с техническими требованиями ОСТ 26-291-94.

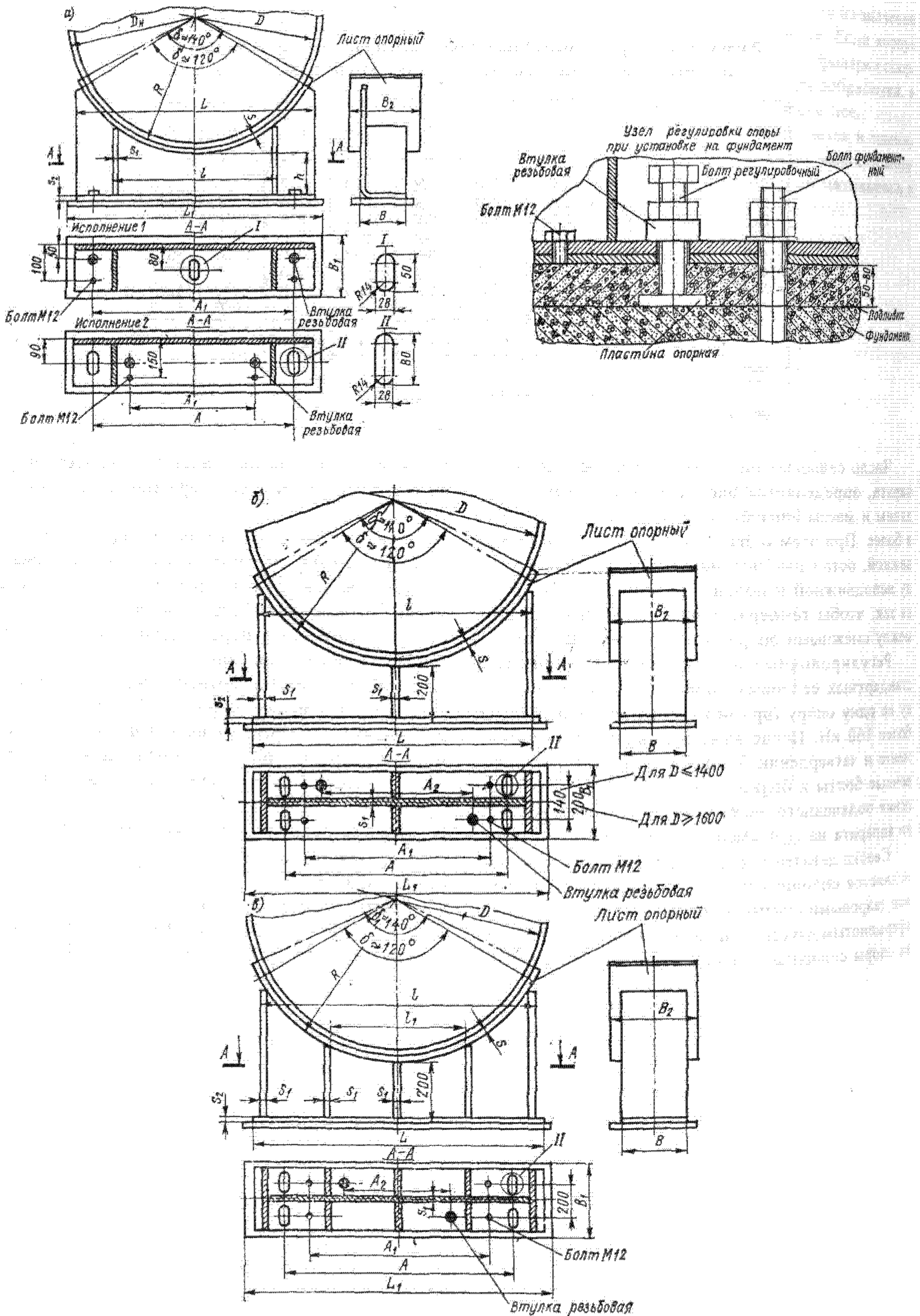


Рис. 20.2 Конструкции стандартных седловых опор под стальные сварные горизонтальные цилиндрические аппараты  
а — тип 1; б — тип 2; в — тип 3

Таблица 20.5

**Опоры седловые типа 1 (рис. 20.2, а),  
OCT 26-1265—75, мм**

$D_H$	$Q, \text{ кН}$	$s_1$	$s_2$	$R$	$L$	$t$	$h$	$A$	$A_t$
159	16			84	180	90	75	—	140
219	20	6	10	114	240	140	75	—	200
273	20			141	290	190	100	—	250
325	20	6	10	167	400	240	125	—	—
377				193			135	330	130
400*	50	8	14	214; 222; 230					
426				217	450	250	135	—	—
480				244			145	—	—
500*	60			264; 272; 282	500	300	—	380	160
530				271			200	—	—
600*		10	16	314; 322; 332	600	340	—	450	200
630	80			325					

Примечания. 1. Для аппаратов с  $D_H \leq 273$  мм  $B = 120$  мм; для аппаратов с  $D_H \geq 325$  мм  $B = 180$  мм. 2. Размеры опорной плиты  $L_1 = L + 20$  мм;  $B_1 = B + 80$  мм. 3. Втулки резьбовые: для  $D_H \leq 325$  мм  $d = M16$ ; для  $D_H = 377\text{--}480$  мм  $d = M24$ ; для  $D_H = 500\text{--}630$  мм  $d = M36$ . 4. Размер  $B_1$  см. в табл. 20.7.

Примеры условного обозначения опоры типа 1 исполнения I с  $Q = 20$  кН,  $R = 167$  мм, исполнения по материалу I (см. табл. 20.8), без опорного листа:

Опора 20-167-I OCT 26-1265—75;

то же с опорным листом:

Опора 20-167-I-II OCT 26-1265—75;

\* Внутренний диаметр  $D$ .

Таблица 20.6

**Опоры седловые типа 2 и 3 (рис. 20.2, б, в), OCT 26-1265—75, мм**

$D$	$Q, \text{ кН}$	$s_1$		$s_2$		$R$	$L$	$t$	$A$	$A_t$	$A_1$						
		Исполнение															
		1	2	1	2												
800	80	160		14	14	18	414; 422;	740	—	50	400						
							432; 442				250						
1000	125	200	8	14	14	18	514; 522;	1000	—	650	550						
							532; 546				400						
1200	125	200		12	14	18	614; 622;	1100		800	700						
							630; 638				550						

Продолжение табл. 20.6

D	Q, кН	$s_1$		$s_2$		R	L	$t_f$	A	$A_t$	A	
		1	2	1	2							
	Исполнение											
1400	160	250		12	14	20	714; 722; 732; 744	1250		950	850	700
1600	160	300	8	12	14	20	814; 822; 832	1420		1100	1000	850
1800	160	300		12	14	20	914; 922; 930; 936	1600		1100	1000	850
2000	250	400		12	16	20	1014; 1022; 1032; 1042	1770		1500	1400	1250
2200	250	500	8	14	14	20	1116; 1124; 1132; 1146	1940	940	1500	1300	750
2400	400	630	10	18	18	22	1216; 1224; 1232; 1246	2120	1050	1800	1600	750
2600	400	750	10	18	18	22	1316; 1324; 1332; 1346	2290	1100	1800	1600	750
2800	400	750	10	18	18	22	1416; 1424; 1432; 1446	2460	1200	2200	2000	1000
3000	630	900	14	18	20	22	1520; 1528; 1540	2640	1300	2200	2000	1000
3200	630	900	14	18	20	22	1620; 1628; 1634; 1640	2810	1360	2200	2000	1200
3400	630	1400	12	24	20	26	1720; 1726; 1732; 1740	2990	1470	2390	2190	1200
3600	630	1400	12	24	18	26	1820; 1828; 1834	3160	1570	2800	2600	1400
3800	630	1400	12	22	18	24	1920; 1928; 1934	3330	1650	2800	2600	1400
4000	630	1400	12	20	18	24	2020; 2028; 2034	3510	1740	2800	2600	1400

Примечания. 1. Для всех опор  $t = L - 20$  мм. 2. Ширина опоры: для  $D \leq 1400$  мм  $B = 250$  мм; для  $D \geq 1600$  мм  $B = 300$  мм. 3. Размеры опорной плиты:  $L_1 = L + 20$  мм;  $B_1 = B + 100$  мм. 4. Втулки резьбовые для всех опор имеют диаметр  $d = M48 \cdot 5$ . Размер  $B_2$  см. в табл. 20.7.

Примеры условного обозначения опоры типа 2 исполнения 2 с  $Q = 200$  кН,  $R = 630$  мм, исполнения по материалу 2 (см. табл. 20.8), без опорного листа:

Опора 200-630-2-I OCT 26-1265-75;

то же с опорным листом:

Опора 200-630-2-II OCT 26-1265-75.

Таблица 20.7

### Опорные листы к седловым опорам (рис. 20.2), OCT 26-1267-75, мм

D	R	s	B <sub>2</sub>	D	R	s	B <sub>1</sub>
159*	84			325*	167		
219*	114	4	140	377*	193	4	220
273*	141						

Продолжение табл. 20.7

<i>D</i>	<i>R</i>	<i>s</i>	<i>B<sub>2</sub></i>	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>s</i>	<i>B<sub>2</sub></i>
400	214	10; 8; 6; 4	1600	814	10; 8; 6	400	400
	222			822	12; 10; 8; 6		
	230	10; 8; 6		832	14; 12; 10; 8; 6		
426 *	217	4	1800	914	10; 8; 6	400	400
	244			922	12; 10; 8; 6		
	264	10; 8; 6; 4		930	12; 10; 8		
500	272		220	936		450	450
	282	12; 10; 8; 6		1014	10; 8; 6		
	271	6		1022	12; 10; 8; 6		
600	314	10; 8; 6	360	1032	14; 12; 10; 8; 6	500	500
	322	12; 10; 8; 6		1042	14; 12; 10; 6		
	332	14; 12; 10; 8; 6		1116	10; 8; 6		
630 *	325	10	2200	1124	12; 10; 8	540	540
	414	10; 8; 6		1132	14; 12; 10; 8		
	422	12; 10; 8; 6		1146	20; 18; 16; 14; 10		
800	432	14; 12; 10; 8; 6	360	1216	10; 8; 6	450	450
	442	14; 12; 10; 6		1224	12; 10; 8		
	514	10; 8; 6		1232	14; 12; 10; 8		
1000	522	12; 10; 8; 6	2600	1246	20; 18; 16; 14; 10	500	500
	532	14; 12; 10; 8; 6		1316	10; 8; 6		
	546	18; 16; 14; 10; 6		1324	12; 10; 8		
1200	614	10; 8; 6	2800	1332	14; 12; 10; 8	540	540
	622	12; 10; 8; 6		1346	20; 18; 16; 14; 10		
	630			1416	10; 8; 6		
1400	638	12; 10; 8	3000	1424	12; 10; 8	500	500
	714	10; 8; 6		1432	14; 12; 10; 8		
	722	12; 10; 8; 6		1446	20; 18; 16; 14; 10		
1720	732	14; 12; 10; 8; 6	400	1520	12; 10; 8	540	540
	744	16; 14; 12; 8		1528	14; 12; 10; 8		
	1726			1540	18; 16; 14; 12; 10		
1732	1740	14; 12; 10	500	1620	12; 10; 8	540	540
	1720			1628			
	1726	12; 10; 8		1634	14; 12; 10		
1732	1732			1640			
	1740	14; 12; 10	3800	1920	12; 10; 8		
	1732			1928	14; 12; 10		
1820	1820	12; 10; 8		1934		540	540
	1828		540	2020	12; 10; 8		
	1834	14; 12; 10		2028	14; 12; 10		

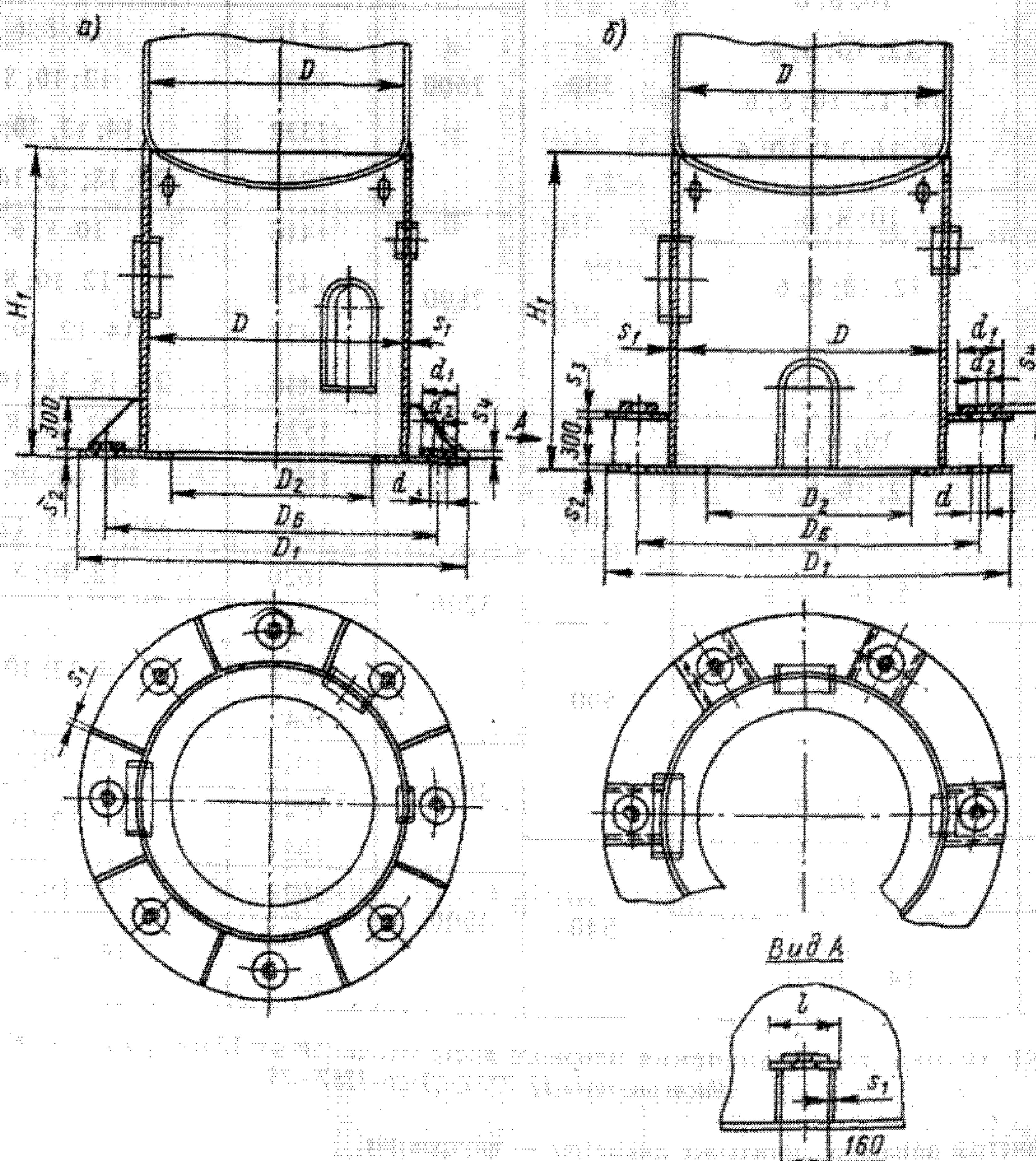
Пример условного обозначения опорного листа толщиной *s* = 12 мм, радиусом *R* = 722 мм:  
Лист опорный 12-722 OCT 26-1267-75.

\* Наружные диаметры аппарата, остальные диаметры — внутренние.

Таблица 20.8.

**Материал седловых опор в зависимости от вместимости аппарата, температуры рабочей среды и температуры самой холодной пятидневки, ОСТ 26-1265-75**

Использование по материалу	Вместимость аппарата, м <sup>3</sup>	Температура, °С		Марка стали
		рабочей среды	самой холодной пятидневки	
1	$\leq 100$	От — 30 до 350	— 30	Ст3кл2, ГОСТ 380—94
		От — 40 до 350	— 40	Ст3пс3, ГОСТ 380—94
2	$> 100$	От — 30 до 350	— 30	Ст3пс4, ГОСТ 380—94
		От — 40 до 350	— 40	16ГС, ГОСТ 5520—79
3	Не ограничено	От — 40 до 450	— 40	09Г2С, ГОСТ 5520—79
4		Ниже — 40 до — 70	Ниже — 40 до — 65	
5				



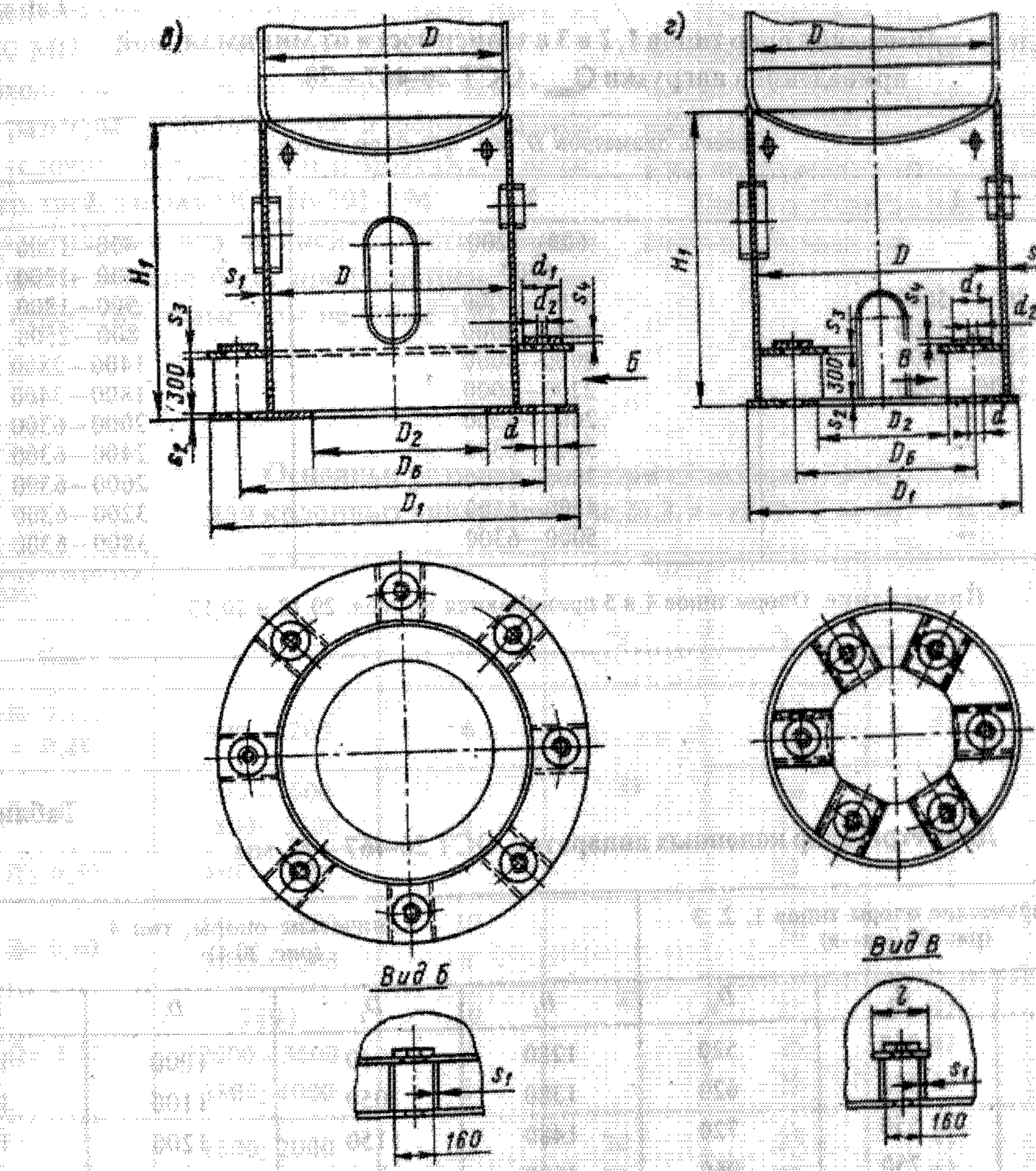


Рис. 20.3. Конструкции стандартных цилиндрических опор для стальных сварных колонных аппаратов: а — тип 1 (с местными косынками); б — тип 2 (с наружными стойками под болты); в — тип 3 (с кольцевым опорным поясом); г — тип 5 (с внутренними стойками под болты)

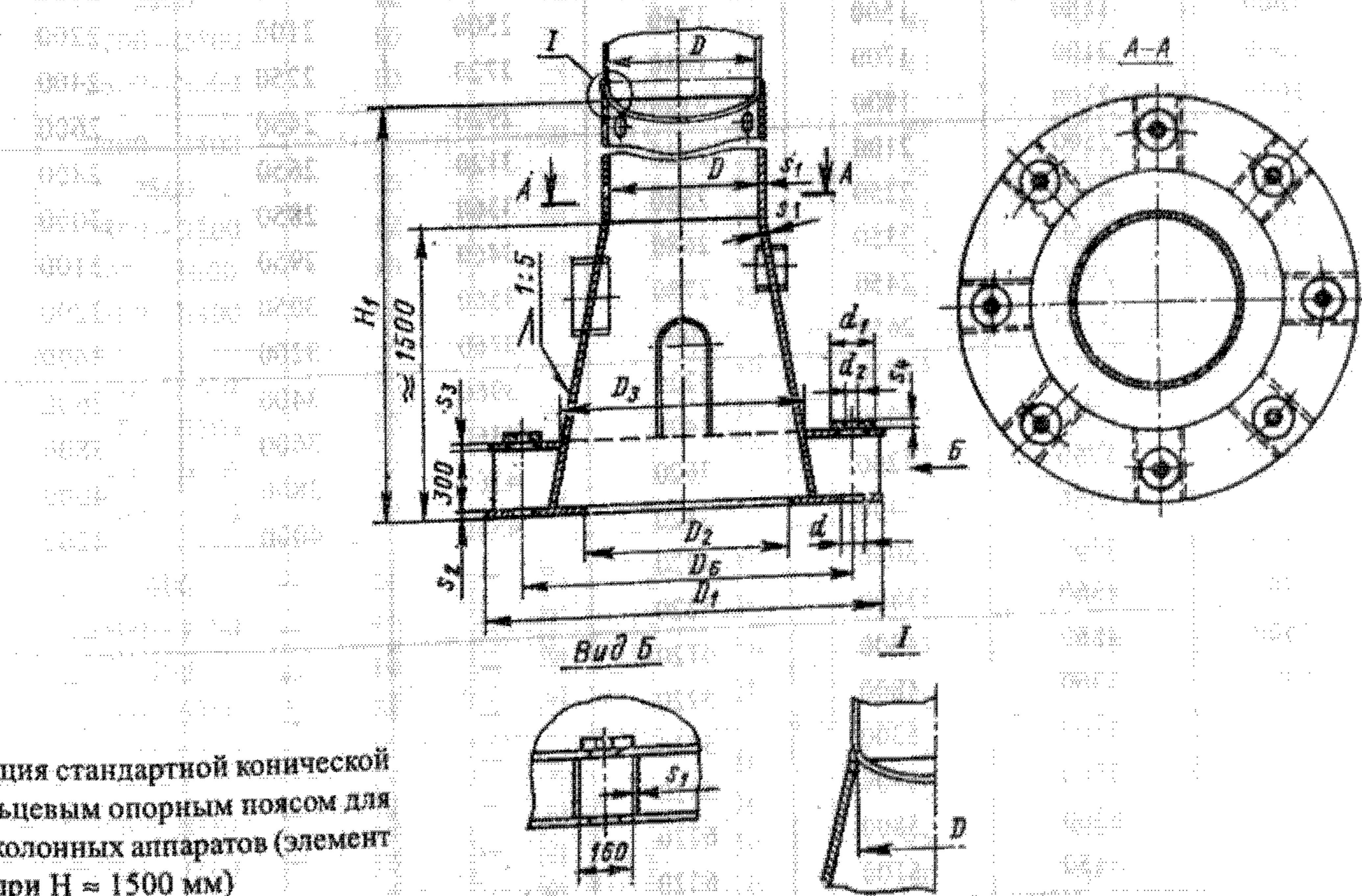


Рис. 20.4. Конструкция стандартной конической опоры (тип 4) с кольцевым опорным поясом для стальных сварных колонных аппаратов (элемент I указан для опор при  $H = 1500$  мм)

Таблица 20.9

**Пределы применения опор типов 1, 2 и 3 в зависимости от минимальной приведенной нагрузки  $Q_{min}$ , ОСТ 26-467-78**

$Q_{min}$ , МН	Область диаметров $D$ , мм, для опор типов		
	1	2	3
0,125	—	600—1200	400—1200
0,20	—	1200	400—1200
0,32	2000—3000	1200—3000	500—1800
0,50	2600—3000	1600—3000	800—2500
0,80	3000—4000	2000—4000	1400—2800
1,32	3600—5000	2200—5000	1800—3400
2,0	—	2600—6300	2000—6300
3,2	—	3000—6300	2400—6300
5,0	—	3800—6300	2600—6300
8,0	—	4500—6300	3200—6300
12,0	—	5000—6300	3800—6300

Примечание. Опоры типов 4 и 5 принимаются по табл. 20.12 и 20.13.

Таблица 20.10

**Диаметры опор колонных аппаратов, ОСТ 26-467-78, мм**

$D$	Цилиндрические опоры типов 1, 2, 3 (рис. 20.3, а—в)			Конические опоры, тип 4 (рис. 20.4)			
	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
400	600	350	520	1280	950	1000	1160
500	700	450	620	1380	1050	1100	1260
600	800	550	720	1480	1150	1200	1360
800	1080	750	960	1680	1300	1400	1560
1000	1280	950	1160	1880	1500	1600	1760
1200	1480	1150	1360	2100	1700	1800	1980
1400	1680	1300	1560	2300	1900	2000	2180
1600	1880	1500	1760	2500	2100	2200	2380
1800	2100	1700	1980	2720	2250	2400	2580
2000	2300	1900	2180	2920	2450	2600	2780
2200	2500	2100	2380	3120	2650	2800	3000
2400	2720	2250	2580	3360	2850	3000	3220
2500	2850	2350	2680	3460	2950	3100	3320
2600	2920	2450	2780	3560	3050	3200	3420
2800	3120	2650	3000	3760	3200	3400	3620
3000	3360	2850	3220	3960	3400	3600	3820
3200	3560	3050	3420	4160	3600	3800	4020
3400	3760	3200	3620	4360	3800	4000	4220
3600	3960	3400	3820	4560	4000	4200	4420
3800	4160	3600	4020	—	—	—	—
4000	4360	3800	4220	—	—	—	—
4500	4860	4300	4720	—	—	—	—
5000	5360	4800	5220	—	—	—	—
5500	5860	5300	5720	—	—	—	—
5600	5960	5400	5820	—	—	—	—
6000	6360	5800	6220	—	—	—	—
6300	6650	6100	6520	—	—	—	—

Предел текучести материала должен быть не менее 210 МПа при температуре 20°C.

Необходимое количество отверстий, лазов (люков), их размеры, расположение и форма выбираются из условий эксплуатации и монтажа и должны отвечать требованиям ОСТ 26-291—94.

Для вентиляции внутренней полости опоры в верхней части должно быть предусмотрено не менее двух отверстий диаметром не более 100 мм.

При приварке опор к днищам, сваренным из отдельных частей, в обечайках опор должны быть предусмотрены вырезы, позволяющие иметь доступ к сварным радиальным швам на днищах. В этом случае отверстия для вентиляции не предусматриваются.

Опорная обечайка должна быть проверена на прочность в зоне вырезов.

Таблица 20.11

**Основные размеры цилиндрических опор типов 1, 2, 3  
для колонных аппаратов (рис. 20.3, а—е), ОСТ 26-467—78, мм**

Приведенная нагрузка, МН		<i>D</i>	<i>s<sub>1</sub></i>	<i>s<sub>2</sub></i>	<i>s<sub>3</sub></i>	<i>d<sub>1</sub></i>	<i>d<sub>2</sub></i>	Число болтов <i>n<sub>b</sub></i>
<i>Q<sub>пр</sub></i>	<i>Q<sub>мин</sub></i>							
0,25	До 0,125 + 0,20	400—1200	6	20	12 16	28	M24	6
	До 0,32	500—1600 1800—3000	8		20 16	35	M30	6 8
	До 0,50	800—3000	10		20			8
1,6	До 0,80	1400—1800 2000—4000	25	20	42	M36	16	
	До 1,32	1800 2000—3600 3800; 4000		10			25	16 16 24
	До 1,32	1800; 2000 2200—2500 2600—3800 4000—5000		12 10 10 10			30 30 25 25	16 16 16 24
2,5	До 2,0	2000 2200—2500 2600—5000	12 10 10	30 30 25	30 30 25	48	M42	16
	До 2,0	2000—2500 2600 2800—3200 3400; 3600 3800—6300	16 16 12 10 10	30 30 30 30 25	30 25 42 42 25	48 42 M36	M42 M36 24	16 16 24 24 24
	До 3,2	2400; 2500 2600—3200 3400; 3600 3800—6300	16 12 10 10	30 30 30 25	30 30 30 25	48 48 48 42	M42 M42 M42 M36	16 16 16 32
6,3	До 3,2	2600 2800—3600 3800 4000—6300	20 16 16 12	36 30 30 30	30 30 30 25	48 48 48 42	M42 M42 M42 M36	24 24 24 32
	До 5,0	2600 2800; 3000 3200—3800 4000—6300	20 16 16 12	36 30 30 30	36 36 30 30	56 56 48 48	M48 M48 M42 M42	24 24 32 32

Продолжение табл.20.11

Приведенная нагрузка, МН		$D$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$d_2$	$d_3$	Число болтов $z_b$
$Q_{\max}$	$Q_{\min}$							
10,0	До 5,0	2800 3000–6300	20	36	36	56	M48	24
	До 8,0	3200–6300			30	48	M42	32
16,0	До 8,0	3400 3600–6300	25 20	40	36	62	M56	32
	До 10,0	3800–6300	20		40	62	M56	36

Примечания. 1. Размеры  $d$  и  $d_1$  в зависимости от  $D$  для опор типов 1,2 и 3: $D$ , мм..... 400–600 800–1600 1800–6300 $d$ , мм..... 45 60 70 $d_1$ , мм..... 70 90 1002. При всех значениях  $D$  принимают  $s_4 \geq 0,5s_2$ ; для опор типа 2 при всех значениях  $D$  принимают  $I = 160 + 4s_1$ .Пример условного обозначения опоры типа 2 при диаметре колонны 1000 мм,  $Q_{\max} = 0,25$  МН,  $Q_{\min} = 0,2$  МН,  $H_1 = 1200$  мм:

Опора 2-1000-25-20-1200 ОСТ 26-467-78.

Таблица 20.12

Основные размеры конических опор (типа 4)  
для колонных аппаратов (рис.20.4), ОСТ 26-467-78, мм

Приведенная нагрузка, МН		$D$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$d_2$	$d_3$	Число болтов $z_b$
$Q_{\max}$	$Q_{\min}$							
4,0	До 2,0	2000–2500	16	30	30	48	M42	16
		2600	16	30	25	42	M36	24
		2800–3200	12	30	25	42	M36	24
		3400; 3600	10	30	25	42	M36	24
		3800–6300	10	25	25	42	M36	24
	До 3,2	2400–2600	16	30	30	48	M42	24
		2800–3200	12	30	30	48	M42	24
		3400; 3600	10	30	30	48	M42	24
	До 5,0	3800–6300	10	25	25	42	M36	32
6,3	До 3,2	2600	20	36	30	48	M42	24
		2800–3600	16	30	30	48	M42	24
		3800	16	30	25	42	M36	32
		4000–6300	12	30	25	42	M36	32
	До 5,0	2600	20	36	36	56	M48	24
		2800; 3000	16	30	36	56	M48	24
		3200–3800	16	30	30	48	M42	32
		4000–6300	12	30	30	48	M42	32

Продолжение табл. 20.12

Приведенная нагрузка, МН		<i>D</i>	<i>s<sub>1</sub></i>	<i>s<sub>2</sub></i>	<i>s<sub>3</sub></i>	<i>d<sub>1</sub></i>	<i>d<sub>2</sub></i>	Число болтов <i>Z<sub>b</sub></i>
<i>Q<sub>max</sub></i>	<i>Q<sub>min</sub></i>							
10,0	До 5,0	2800 3000—6300	20	36	36	56	M48	24
	До 8,0	3200—6300			30	48	M42	32
16,0	До 8,0	3400 3600—6300	25 20	40	36	62	M56	32
	До 10,0	3800—6300	20		40	62	M56	36

Примечание. При всех значениях *D* *d* = 70 мм; *d<sub>1</sub>* = 100 мм; *s<sub>4</sub>* ≥ 0,5*s<sub>2</sub>*.Пример условного обозначения опоры типа 4 при диаметре колонны 3200 мм, *Q<sub>max</sub>* = 6,3 МН, *Q<sub>min</sub>* = 3,2 МН, *H* = 3000 мм:

Опора 4-3200-630-320-3000 ОСТ 26-467-78.

Таблица 20.13

Основные размеры цилиндрических опор типа 5  
для колонных аппаратов (рис. 20.3, *з*), ОСТ 26-467-78, мм

<i>D</i>	Диаметры опор						Число болтов <i>Z<sub>b</sub></i>
	<i>D<sub>1</sub></i>	<i>D<sub>2</sub></i>	<i>D<sub>3</sub></i>	<i>d</i>	<i>d<sub>1</sub></i>	<i>d<sub>2</sub></i>	
3000	3120	2650	2840				
3200	3360	2850	3020				
3400	3560	3050	3220	70	100		
3600	3760	3200	3420				
3800	3960	3400	3620				
4000	4160	3600	3820				
Приведенная нагрузка, МН	<i>D</i>	<i>s<sub>1</sub></i>	<i>s<sub>2</sub></i>	<i>s<sub>3</sub></i>	<i>d<sub>1</sub></i>	<i>d<sub>2</sub></i>	
0,63	До 0,125	3000—3400	8	20	12		8
	До 0,32	3000—4000		25	16		
2,5	До 0,50	3000—4000	10	30	20	35	M30
		3000; 3200	12		20		
	До 0,80	3400; 3600	10		25		
4,0		3800; 4000	12	30	20		16
	До 1,32	3000—4000	16		25	42	M36
	До 2,0	3000—4000	20		36		24

Примечание. При всех значениях *D* принимают *s<sub>4</sub>* ≥ 0,5*s<sub>2</sub>* и *l* = 160 + 4*s<sub>1</sub>*.Пример условного обозначения опоры типа 5 при диаметре колонны 3600 мм, *Q<sub>max</sub>* = 1,6 МН, *Q<sub>min</sub>* = 0,32 МН, *H* = 1500 мм:

Опора 5-3600-160-32-1500 ОСТ 26-467-78.

## 20.2. Расчет опор для вертикальных аппаратов

Собственно опоры расчетом не проверяются, а выбираются стандартные на требуемую нагрузку. Расчету подлежит обечайка цилиндрического аппарата, на которую действуют местные нагрузки, вызываемые опорными лапами.

Ниже приведен метод расчета цилиндрических обечайек в местах установки опорных лап. Данный метод не является нормативным, но он широко вошел в научно-техническую и учебную литературу, отличается простотой и наглядностью, поэтому автор посчитал необходимым включить его в справочник. Метод расчета может быть использован на этапах технического проектирования при последующем согласовании результатов со специализированной научно-исследовательской организацией.

Нормативный метод расчета регламентирован ГОСТ 26202—84 (СТ СЭВ 2574—80), он приведен в приложении № 1 справочника.

**Расчетные нагрузки.** При определении нагрузки на опору-лапу действующие на аппарат нагрузки приводятся к осевой силе  $P$  и моменту  $M$  относительно опорной поверхности лапы. Расчетные нагрузки показаны на рис. 20.5.

Нагрузка на одну опору определяется по формуле:

$$Q = \lambda_1 P/z + \lambda_2 M/(D + 2e), \quad (20.1)$$

где  $e = 0,5(b + f_{\max} + s_0 + s_h)$ ;  $f_{\max}$ ,  $b$  — по табл. 20.1;  $s_0 = s - c - c_1$  — толщина стенки аппарата в конце срока службы;  $s$  — исполнительная толщина стенки аппарата;  $c$  — прибавка для компенсации коррозии;  $c_1$  — дополнительная прибавка;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  — коэффициенты, зависящие от числа опор  $z$ :

$z$	2	3	4
$\lambda_1$	1	1	2**
$\lambda_2$	1*	1,3	1

\* Момент передается только в плоскости опор.

\*\* Допускается принимать  $\lambda_1 = 1$  в технически обоснованных случаях, обеспечивающих равномерное распределение нагрузки между опорами.

Проверка прочности стенки вертикального цилиндрического аппарата под опорой-лапой без накладного листа. Осевое напряжение от внутреннего давления  $p$  и изгибающего момента определяется по формуле:

$$\sigma_{m0x} = pD/(4s_0) + 4M/(\pi D^2 s_0). \quad (20.2)$$

Окружное напряжение от внутреннего давления

$$\sigma_{m0y} = pD/(2s_0). \quad (20.3)$$

Максимальное мембранные напряжение от основных нагрузок определяется из соотношения:

$$\sigma_{m0} = \max (\sigma_{m0x}; \sigma_{m0y}). \quad (20.4)$$

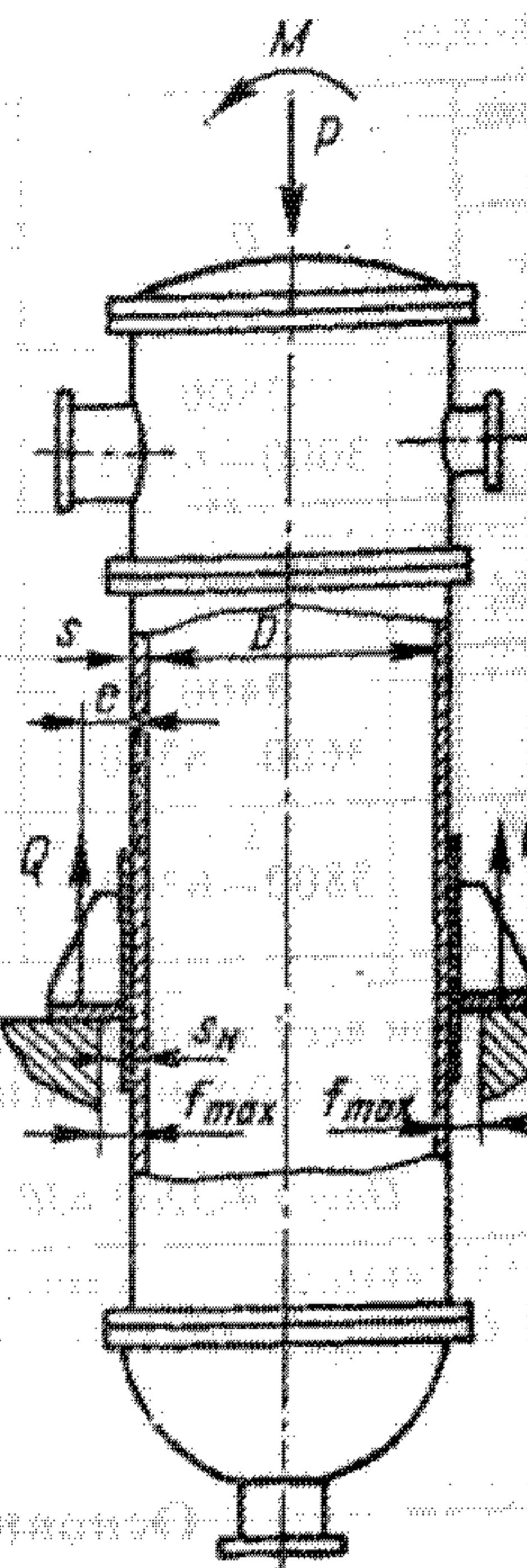


Рис. 20.5. Нагрузки, действующие на аппарат

Максимальное мембранные напряжение от основных нагрузок и реакции опоры определяется по формуле:

$$\sigma_m = \sigma_{m0} \pm K_1 Q e / (D s_0^2), \quad (20.5)$$

где коэффициент  $K_1$  принимается по рис. 20.6 в зависимости от параметров  $\gamma = D/(2s_0)$  и  $h/D$  ( $h$  — высота опоры — см. рис. 20.1).

Максимальное напряжение изгиба от реакции опоры определяется по формуле:

$$\sigma_i = K_2 Q e / (h s_0^2), \quad (20.6)$$

где коэффициент  $K_2$  принимается по рис. 20.7 в зависимости от тех же параметров  $\gamma$  и  $h/D$ .

Условие прочности имеет вид:

$$(\sigma_m/\sigma_t)^2 + \frac{0.8}{A} \frac{\sigma_i}{\sigma_t} < 1, \quad (20.7)$$

где

$A = 1,0$  — для эксплуатационных условий;

$A = 1,2$  — для условий транспортирования, монтажа и гидравлических испытаний.

Если условие (20.7) не выполняется, требуется применить накладной лист.

Проверка прочности стенки вертикального цилиндрического аппарата под опорой-лапой с накладным листом. Максимальное мембранные напряжение от основных нагрузок и реакции опоры определяется по формуле:

$$\sigma_m = \sigma_{m0} \pm K_3 Q_e / A (s_0 + s_n)^2 \quad (20.9)$$

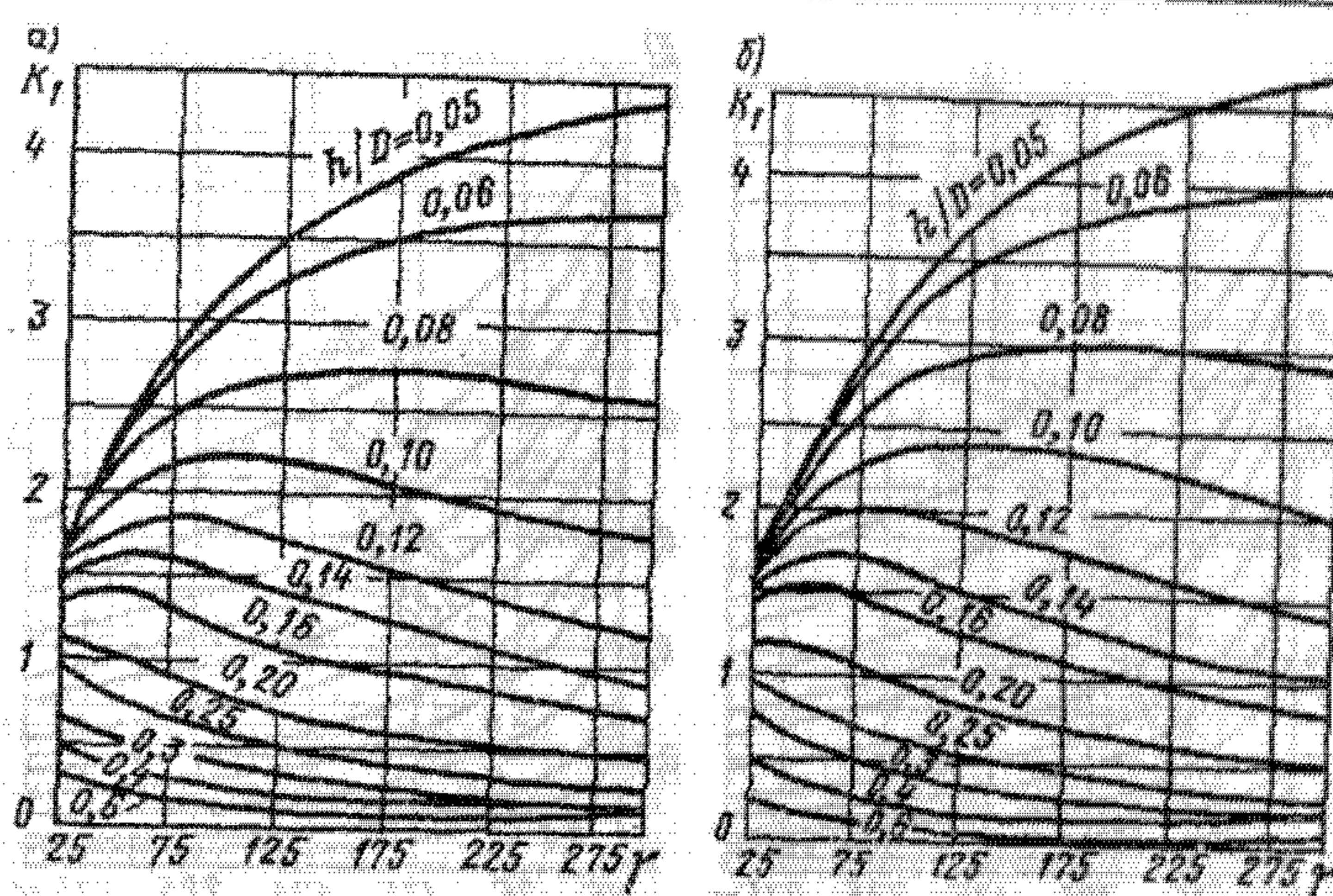


Рис. 20.6. Коэффициент  $K_1$ : а — для опор-лап типа 1; б — для опор-лап типа 2

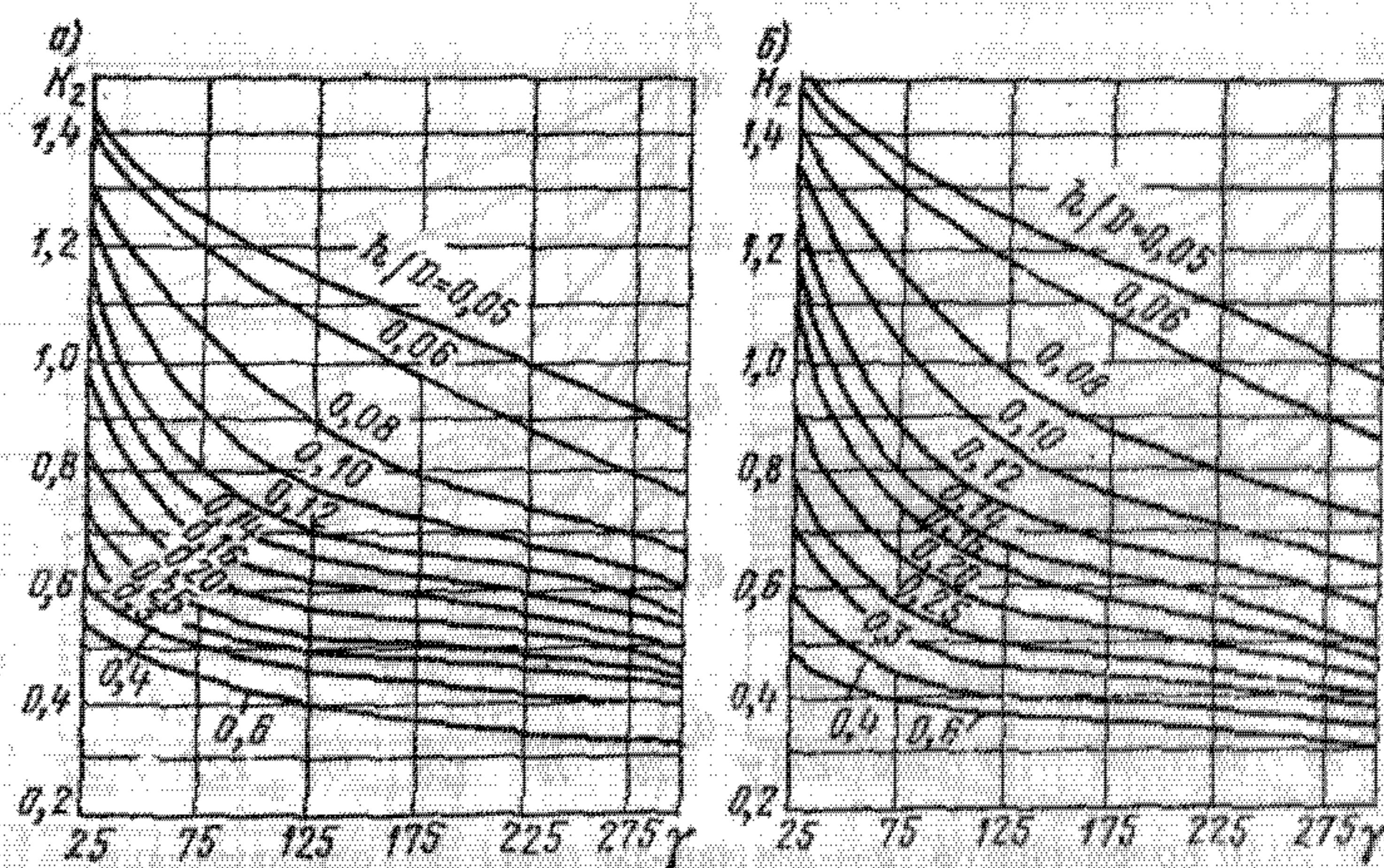


Рис. 20.7. Коэффициент  $K_2$ : а — для опор-лап типа 1; б — для опор-лап типа 2

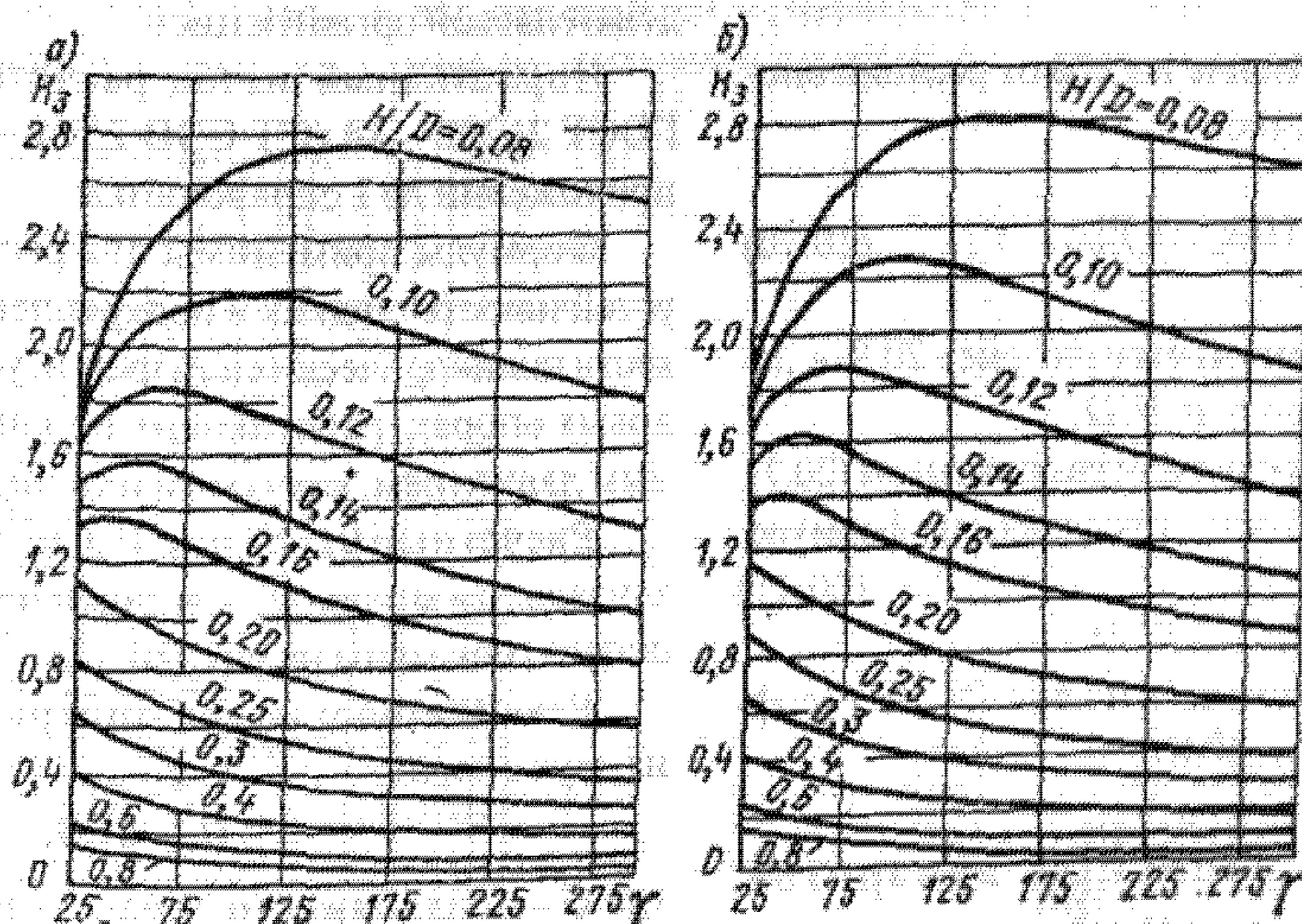


Рис. 20.8. Коэффициент  $K_3$ : а — для опор-лап типа 1; б — для опор-лап типа 2

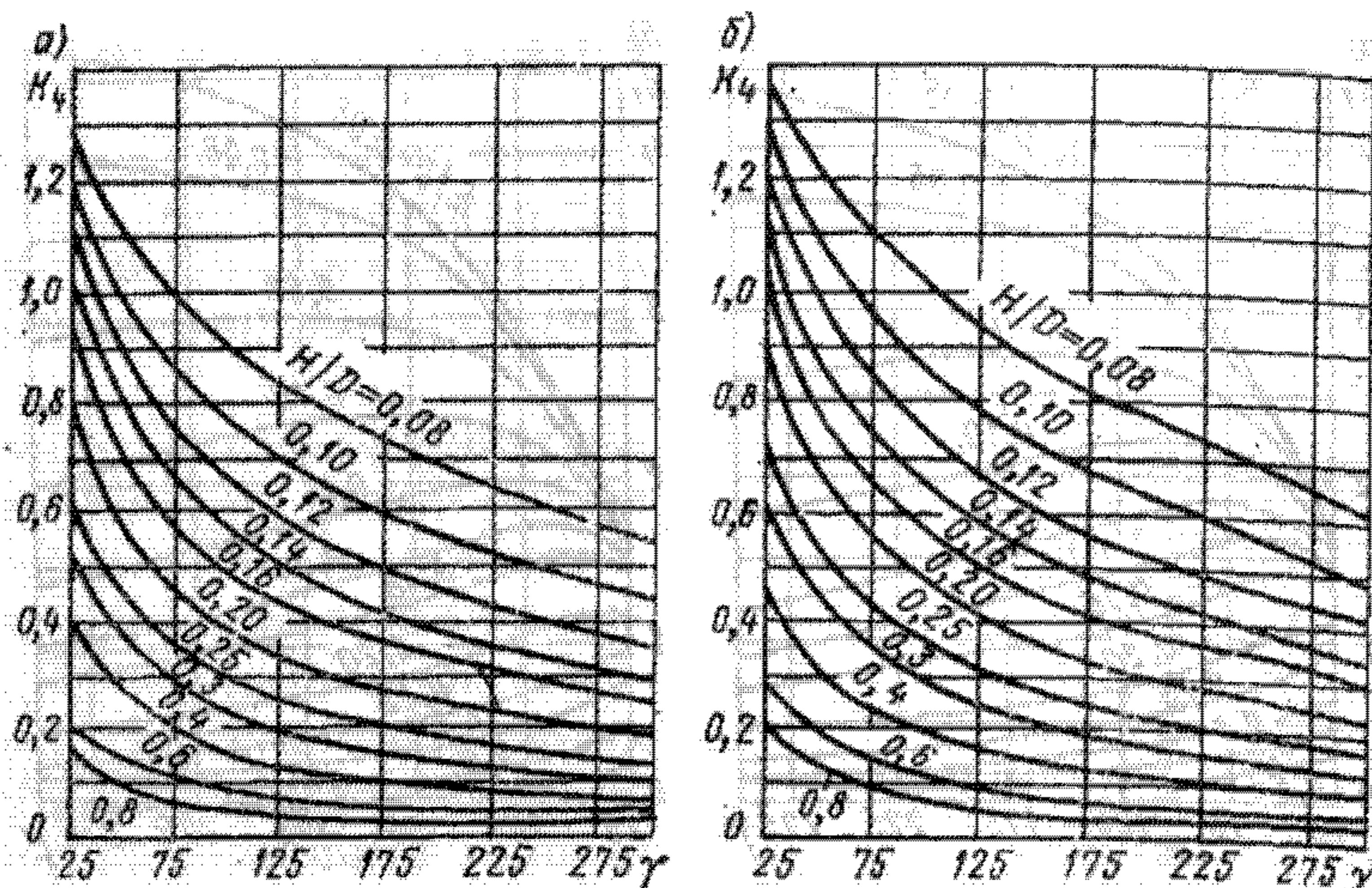


Рис. 20.9. Коэффициент  $K$ : а — для опор-лап типа 1; б — для опор-лап типа 2

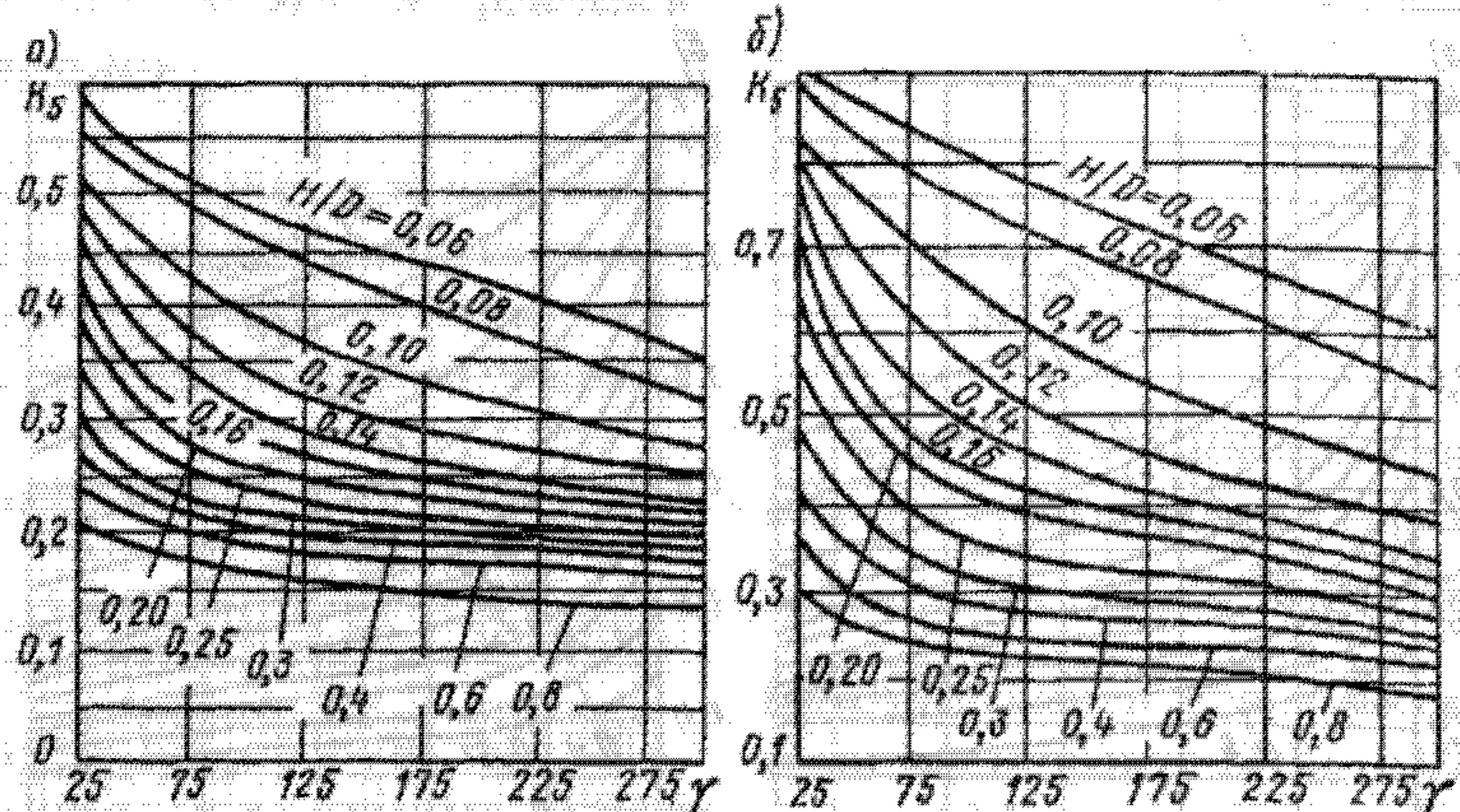


Рис. 20.10. Коэффициент  $K$ : а — для опор-пал типа 1; б — для опор-пал типа 2

где коэффициент  $K$ , принимается по рис. 20.8 в зависимости от параметров  $\gamma$  и  $H/D$  ( $H$  — высота опоры — см. рис. 20.1, 2).

Максимальное напряжение изгиба от реакции опор определяется по формуле:

$$\sigma_n = K_Q \cdot M H(s_n + s)^2, \quad (20.10)$$

где коэффициент  $K_4$  принимается по рис. 20.9 в зависимости от параметров  $\gamma$  и  $H/D$ .

Условие прочности определяется выражением (20.7).

Толщину накладного листа определяют по формуле:

$$s_H = \sqrt{K_s Q / (A \sigma_T)}, \quad (20.11)$$

где коэффициент  $K$ , принимается по рис. 20.10, а коэффициент  $A$  — по условиям (20.8).

### 20.3. Расчет горизонтальных аппаратов, установленных на седловых опорах

Приведенный метод расчета не является нормативным, но он может быть использован на этапах техни-

График зависимости коэффициента  $R_o/R_i$  от коэффициента  $R_s/R_o$  для опор-лап типа 1; 6

$R_s/R_o$	0,05	0,08	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,60	0,80
$R_o/R_i$	0,10	0,12	0,15	0,18	0,22	0,28	0,35	0,45	0,65	1,05	1,25

ческого проектирования при последующем согласовании результатов со специализированной научно-исследовательской организацией.

Нормативный метод расчета регламентирован ГОСТ 26202—84 (СТ СЭВ 2574—80), он приведен в приложении № 1 справочника.

**Формулы применимы для расчета на прочность и устойчивость гладких и подкрепленных кольцами жесткости цилиндрических аппаратов, установленных на скловых опорах, работающих под внутренним избыточным давлением, вакуумом или под налив.**

**Расчетные нагрузки.** Расчетные нагрузки в горизонтальном аппарате, установленном на двух седловых опорах, показаны на рис. 20.11.

## Реакция опоры для аппарата, установленного на двух опорах.

$$Q = 0,6G \quad (20.12)$$

где  $G$  — сила тяжести аппарата в рабочем состоянии, мН.

## Реакция опоры для аппарата, установленного на нескольких опорах.

$$\Omega_1 = \psi G/2, \quad (20.1)$$

где  $z$  — число опор;  $\psi_i$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.12.

Изгибающий момент в середине аппарата

$$M_1 = Q (f_1 L - a). \quad (20.14)$$

Изгибающий момент в сечении над опорой

$$M_2 = \frac{Qa}{f_2} (1 - a/L + 0.5 f_3 D/a - f_4) \text{ при } z = 2; \quad (20.15)$$

$$M_2 = 0.125 Q l^2 / \left( L + \frac{4}{3} H \right) \text{ при } z \geq 3. \quad (20.16)$$

где  $f_1, f_2, f_3$  — коэффициенты, принимаемые по рис. 20.13—20.15 в зависимости от параметров  $L/D$  и  $H/D$ , а  $= 0.2D$  для аппаратов без колец жесткости и  $a = 0.2L$  для аппаратов, подкрепленных кольцами жесткости.

Изгибающий момент в сечении над приварной седловой опорой в случае ее скольжения по опорной пли-те определяется по формуле:

$$M'_2 = M_2 + 0.08 Q (h_1 + h_2). \quad (20.17)$$

где  $h_1, h_2$  — высота ребер опоры (см. рис. 20.24).

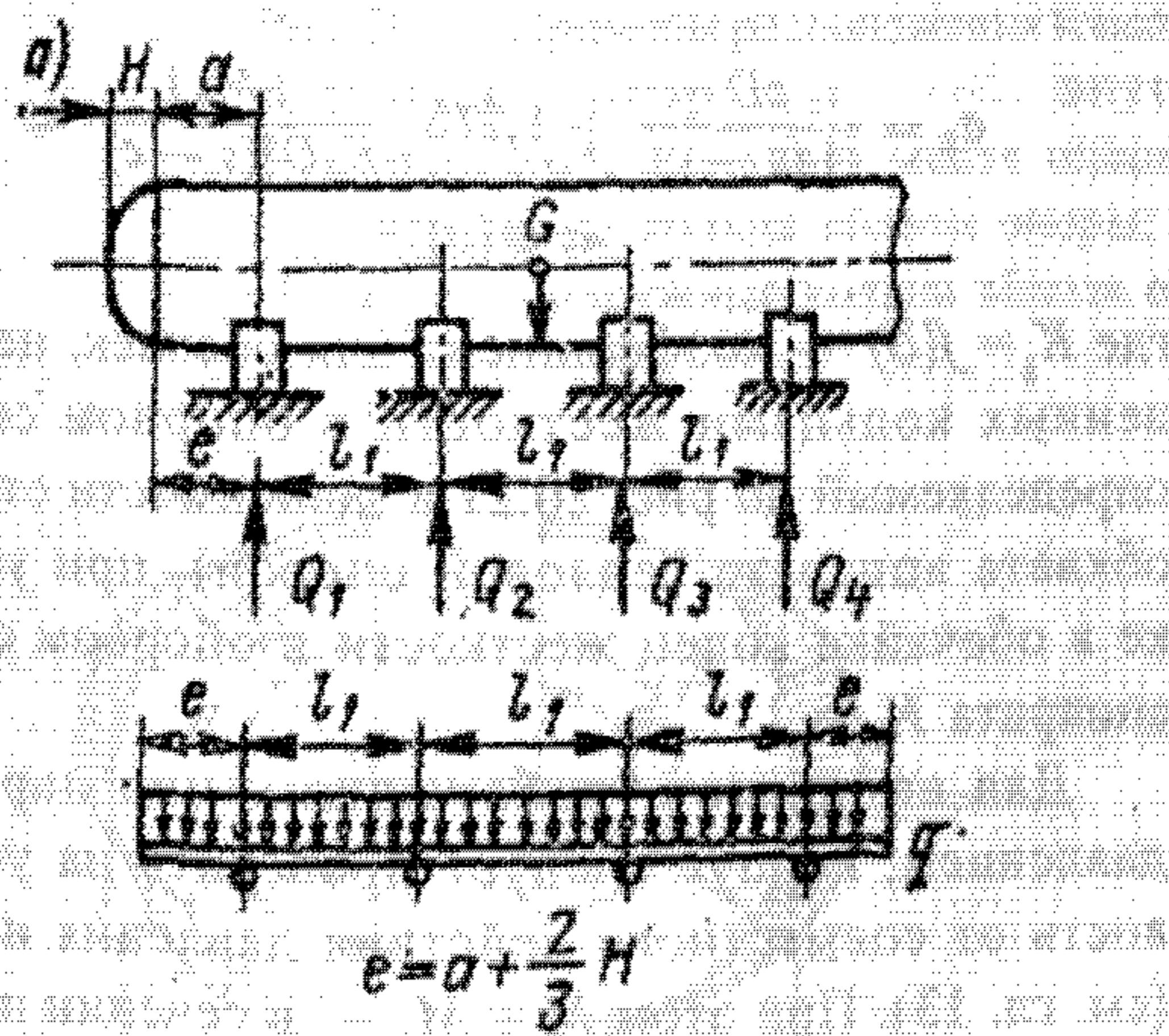


Рис. 20.12. Графики для определения коэффициента  $\psi_i$  ( $i$  — порядковый номер опоры);  $a$  — схема распределения нагрузок;  $b$  — расчетные графики

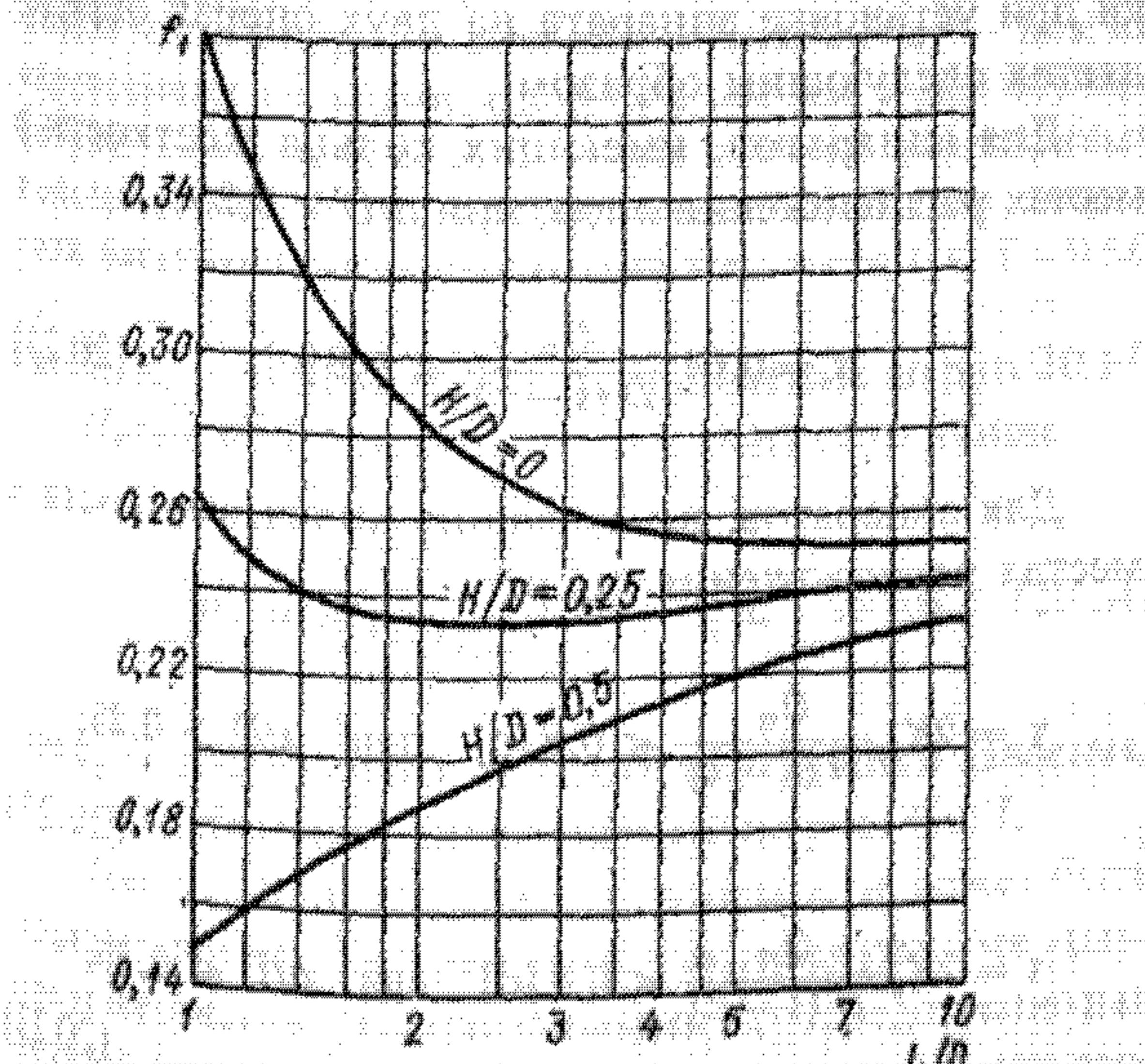
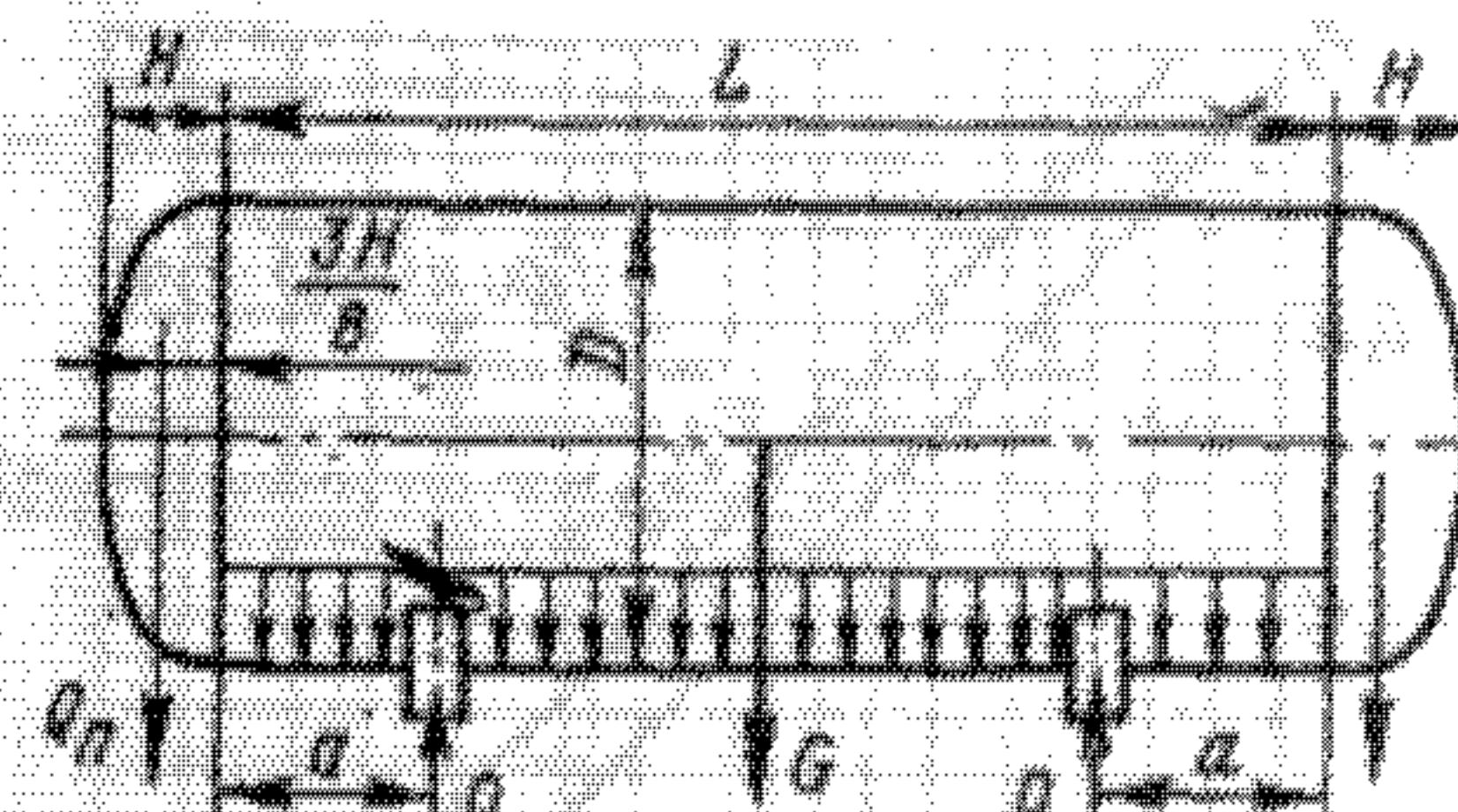
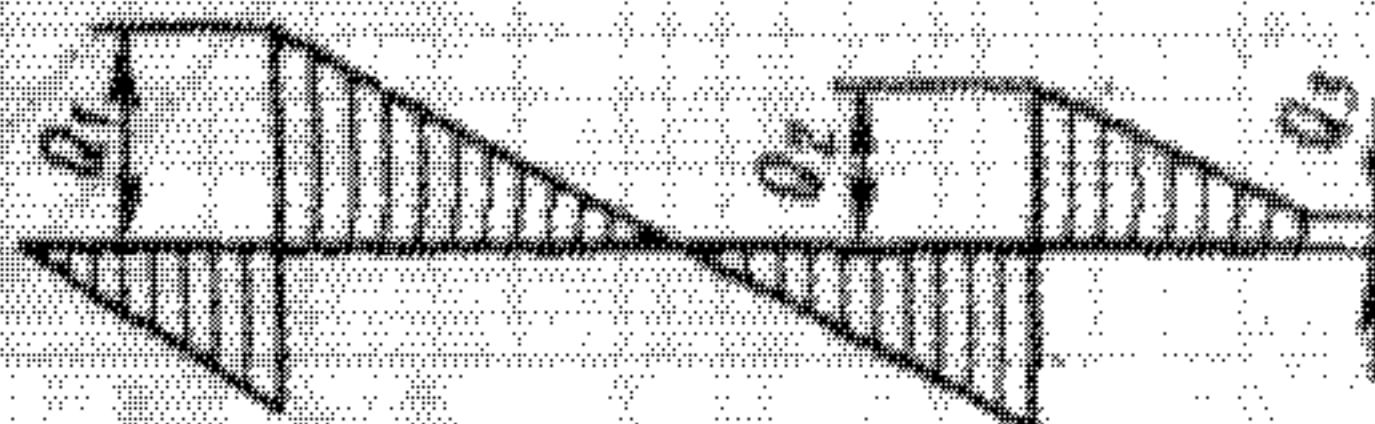


Рис. 20.13. График для определения коэффициента  $f_1$



Эпюра поперечных сил



Эпюра изгибающих моментов

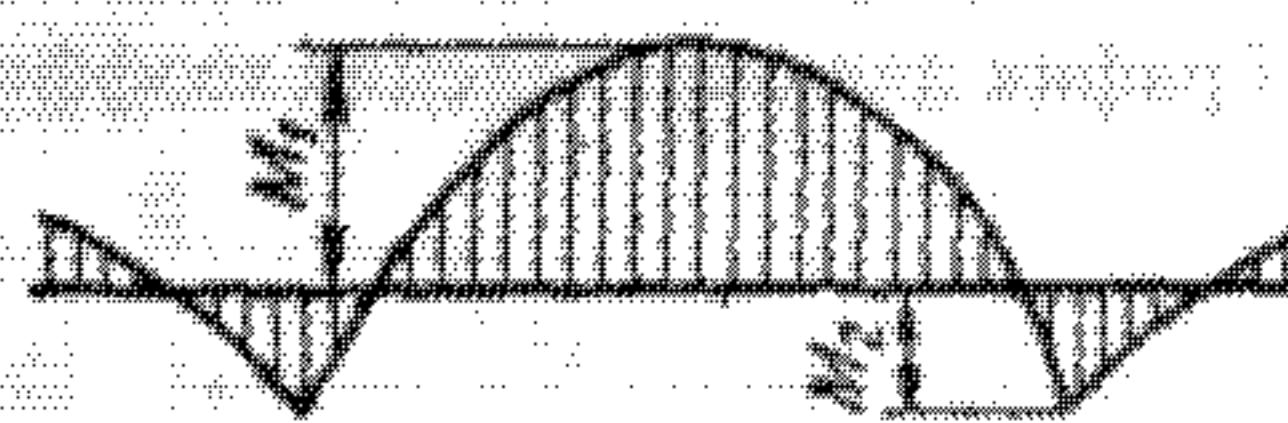


Рис. 20.11. Расчетные нагрузки в горизонтальном аппарате, установленном на двух седловых опорах

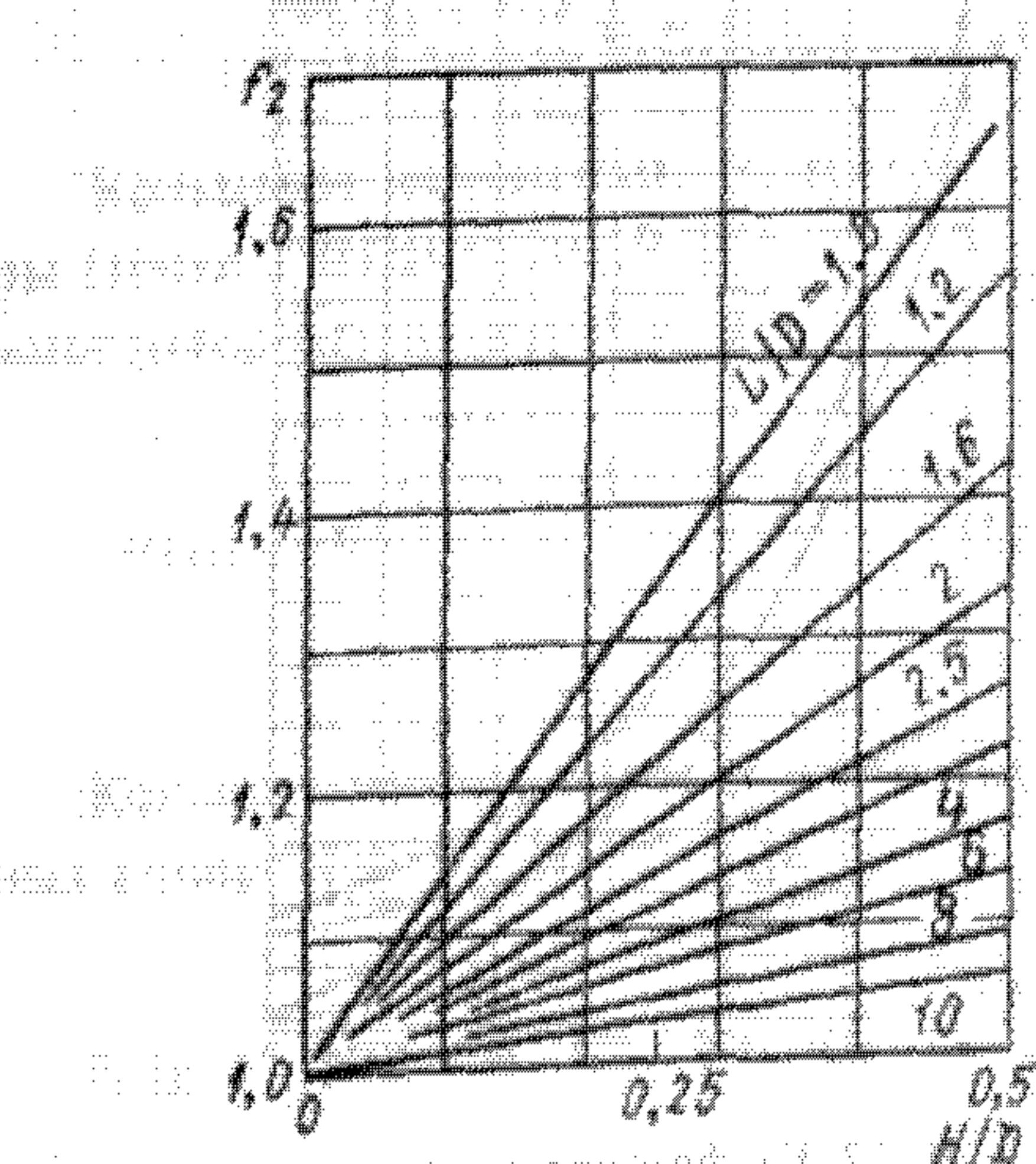
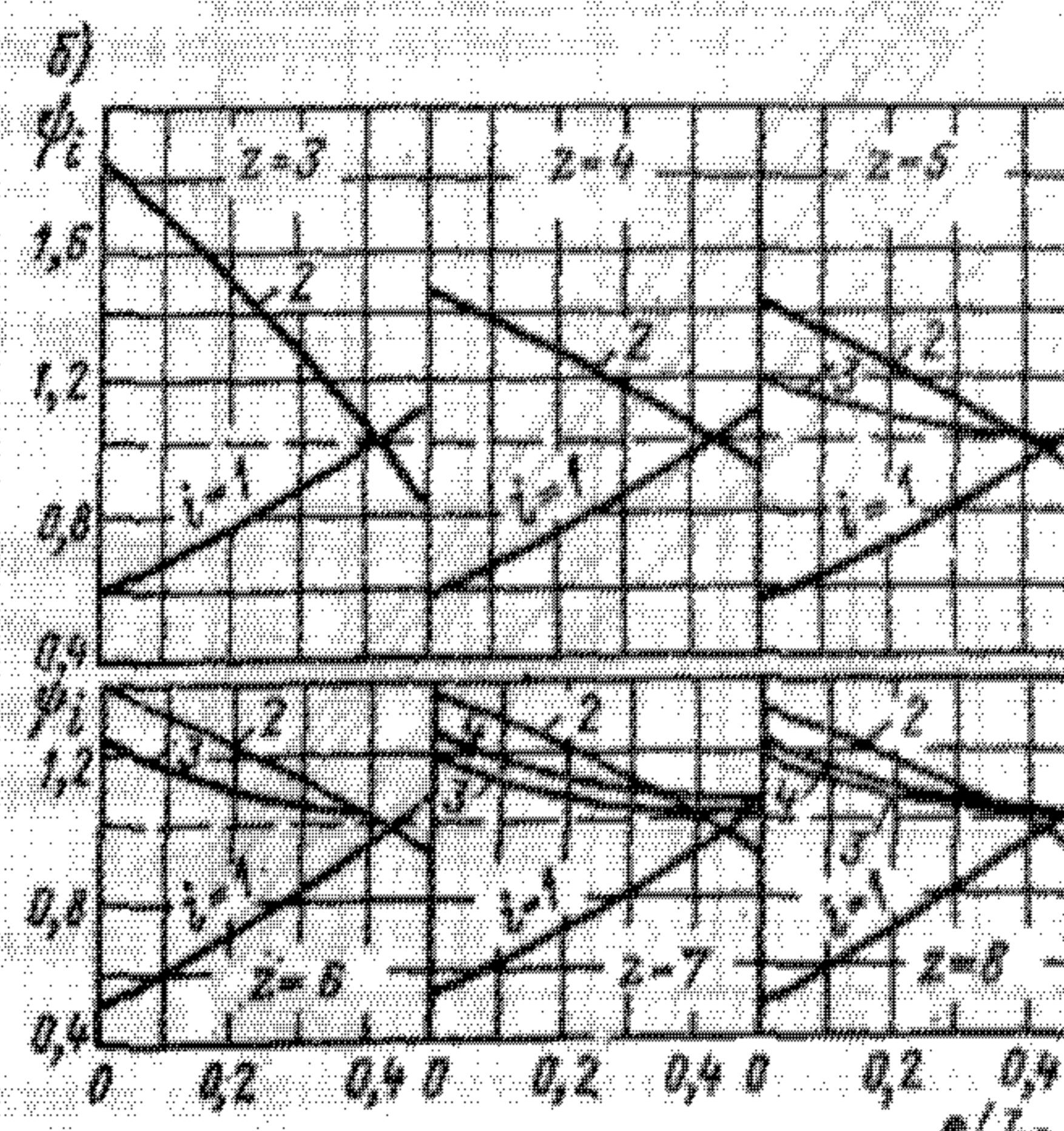
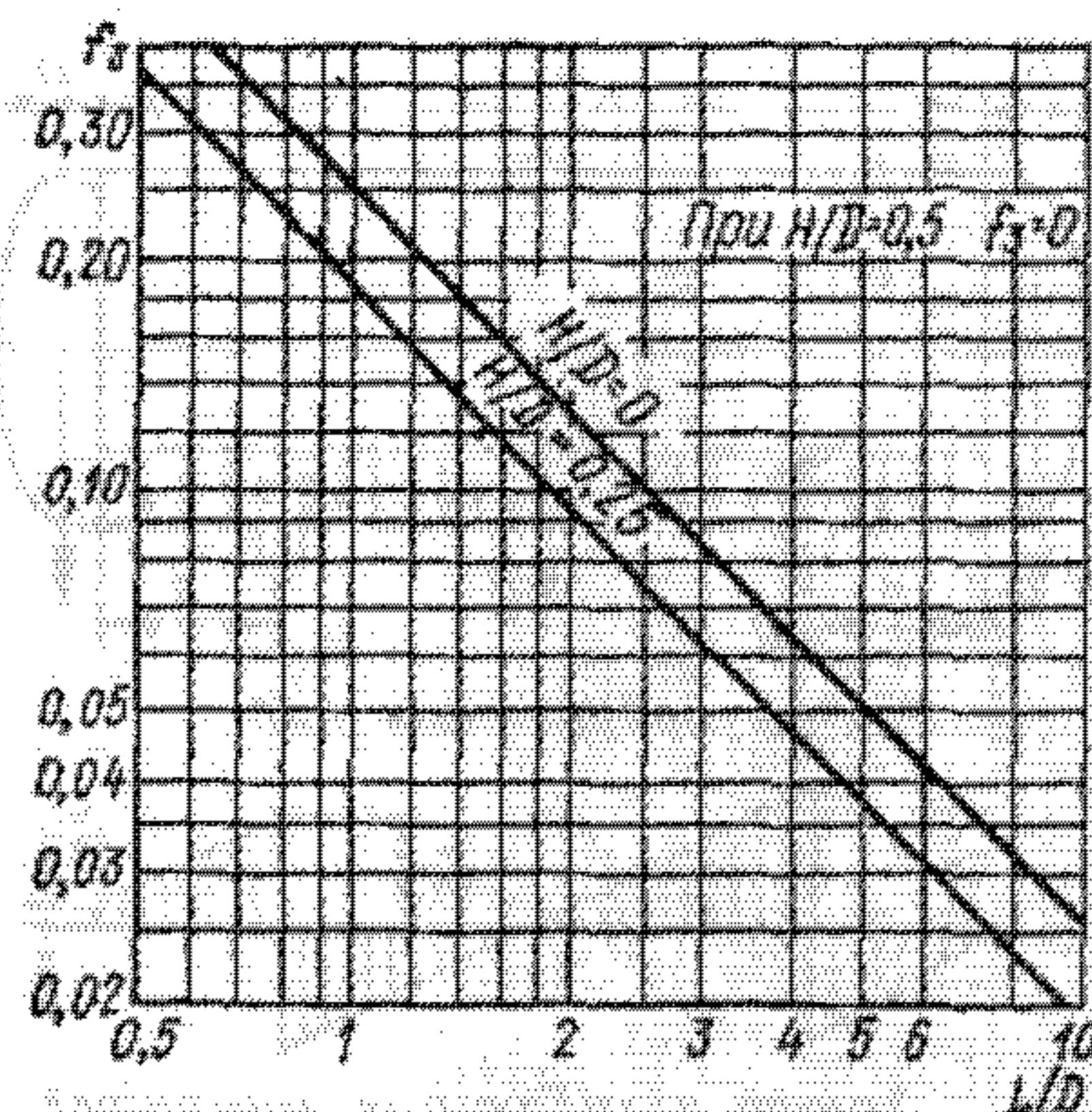


Рис. 20.14. График для определения коэффициента  $f_3$


 Рис. 20.15. График для определения коэффициента  $f_1$ .

Перерезывающая сила для аппарата, установленного на двух опорах:

$$Q_{\pi} = f_4 Q, \quad (20.18)$$

где  $f_4$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.16 в зависимости от параметров  $a/L$  и  $H/L$ .

**Расчет корпуса на прочность.** Корпус аппарата, толщина стенки которого определялась по данным гл. 13, необходимо проверить на прочность: от совместного действия внутреннего давления  $p$  в аппарате и изгиба от реакции опор, от действия перерезывающей силы и кольцевых напряжений в опорном сечении корпуса.

Прочность стенки от *совместного действия внутреннего давления и изгиба от реакции опор* проверяется в двух сечениях: посередине пролета ( $\sigma_1$ ) и над опорой ( $\sigma_2$ ):

$$\sigma_1 = \frac{\rho D}{4(s-c)} + 1,275 \frac{|M_1|}{D^2(s-c)} < \phi[\sigma]; \quad (20.19)$$

$$\sigma_2 = \frac{\rho D}{4(s-c)} + 1,275 \frac{|M_2|}{K_e D^2(s-c)} < \phi[\sigma], \quad (20.20)$$

где  $K_e = f(\delta)$  — коэффициент для обечайок, не укрепленных кольцами жесткости в опорном сечении, определяемый по рис. 20.21 в зависимости от  $\delta$  (угла обхвата аппарата седловой опорой), при установке в обечайке колец жесткости в опорном сечении аппарата  $K_e = 1$ .

Для аппаратов, работающих под наружным давлением, корпус следует проверить на устойчивость от совместного действия давления и изгиба (см. гл. 13). При этом  $M = M_1$  — в сечении посередине аппарата;  $M = M'/K_e$  или  $M = M_2/K_e$  — в сечении над опорой.

*Напряжение среза  $\tau$  в опорном сечении обечайки* при установке аппарата на двух опорах определяется следующим образом.

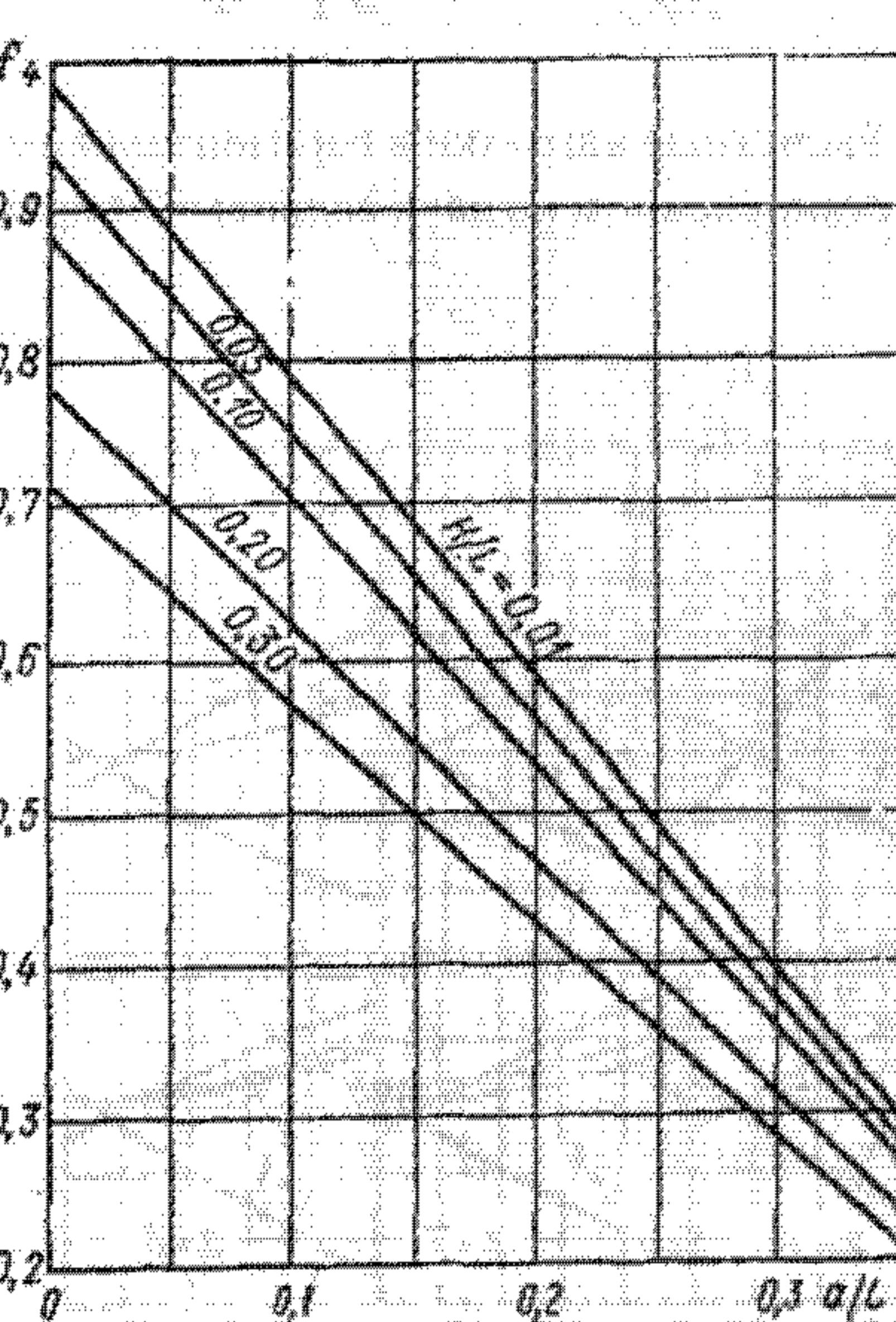
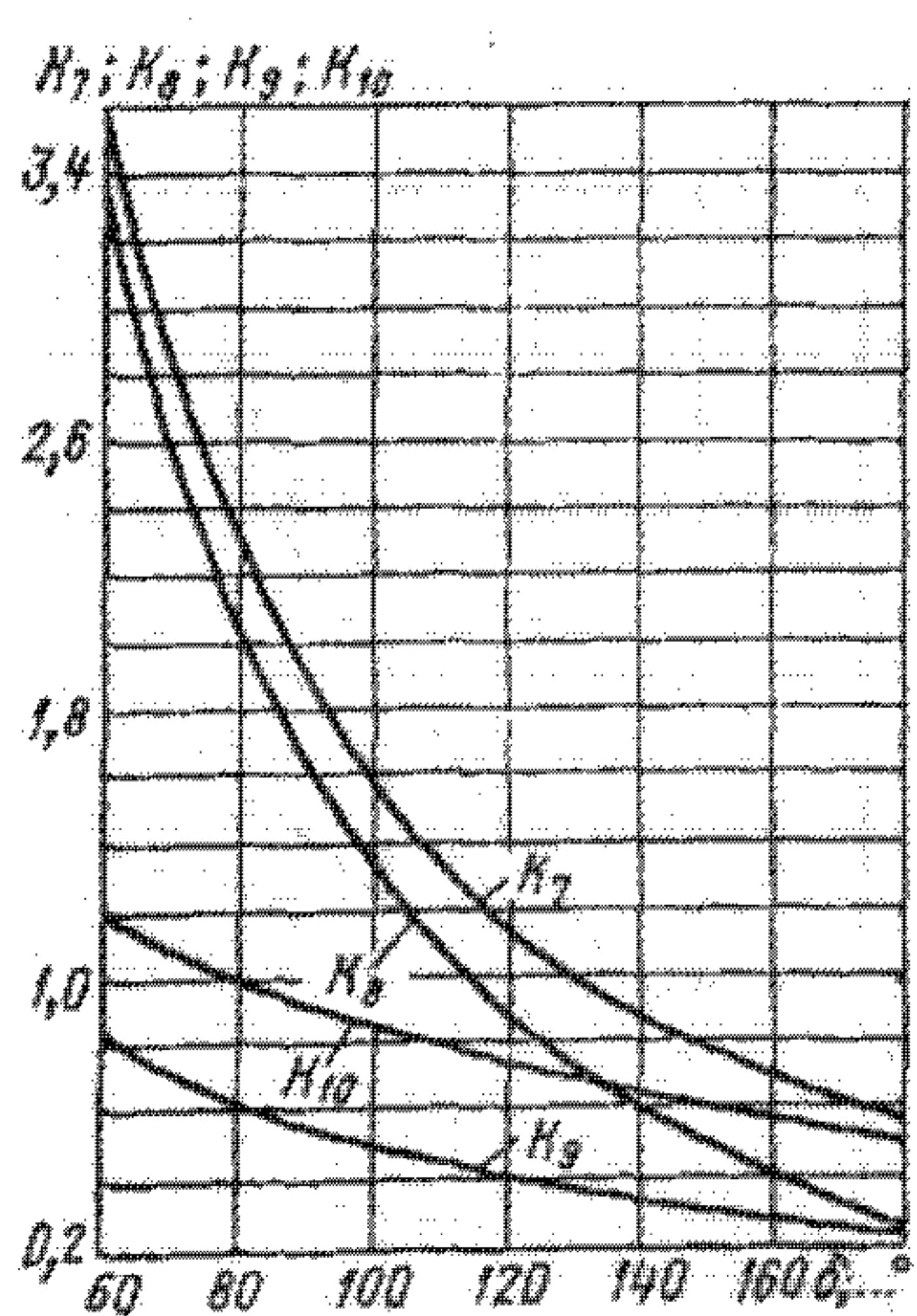
Для аппаратов, имеющих кольца жесткости в местах расположения опор, при  $a/D > 0,25$ :

$$\tau = 0,64 \frac{Q_{\pi}}{D(s-c)} < 0,8[\sigma]. \quad (20.21)$$

Для аппаратов, не имеющих колец жесткости в местах расположения опор:

$$\tau = 2K_e \frac{Q_{\pi}}{D(s-c)} < 0,8[\sigma] \quad \text{при } a/D > 0,25; \quad (20.22)$$

$$\tau = 2K_e \frac{Q_{\pi}}{D(s-c)} < 0,8[\sigma] \quad \text{при } a/D < 0,25. \quad (20.23)$$


 Рис. 20.16. График для определения коэффициента  $f_4$ .

 Рис. 20.17. График для определения коэффициентов  $K_7$ — $K_{10}$ .

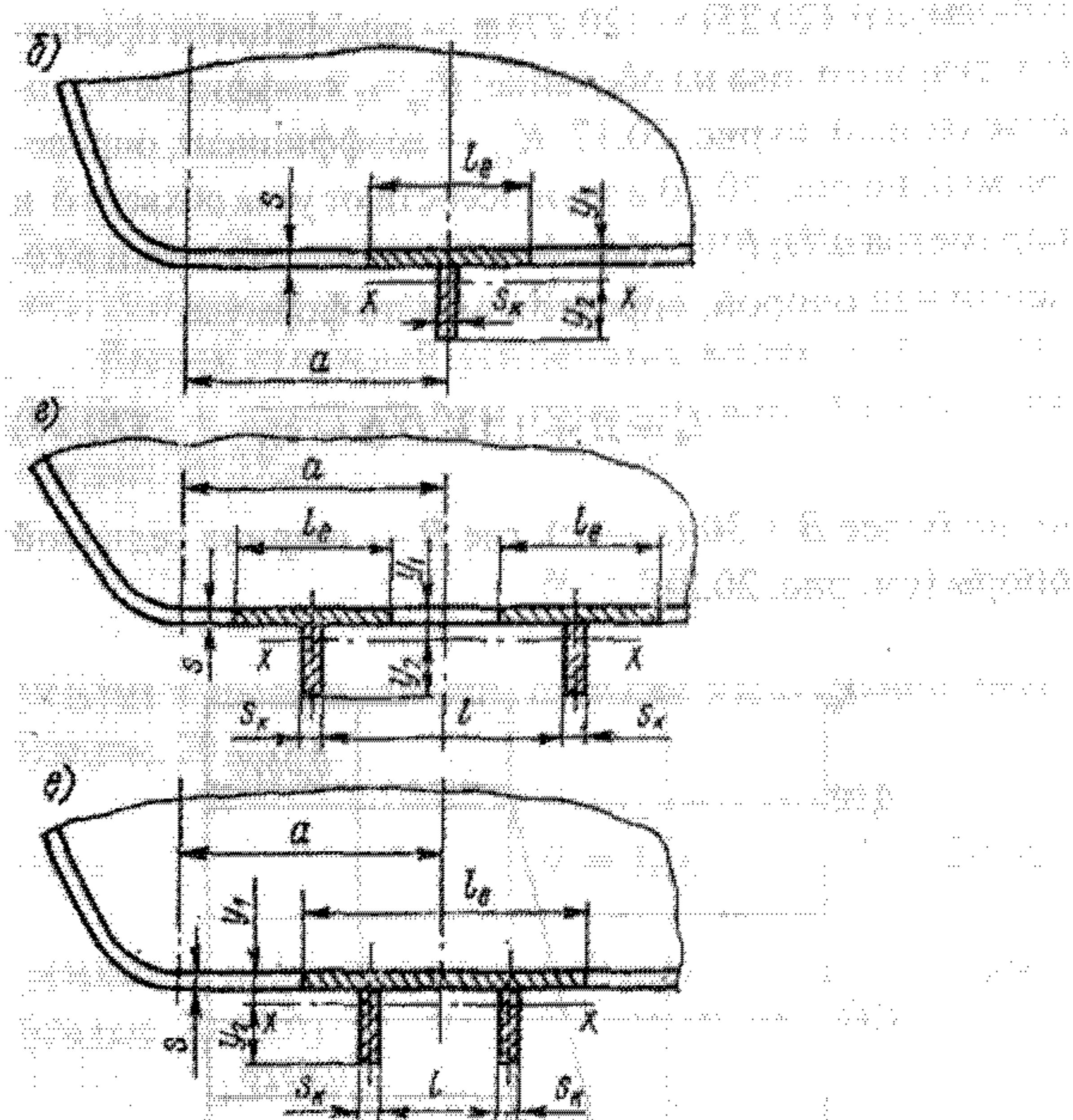
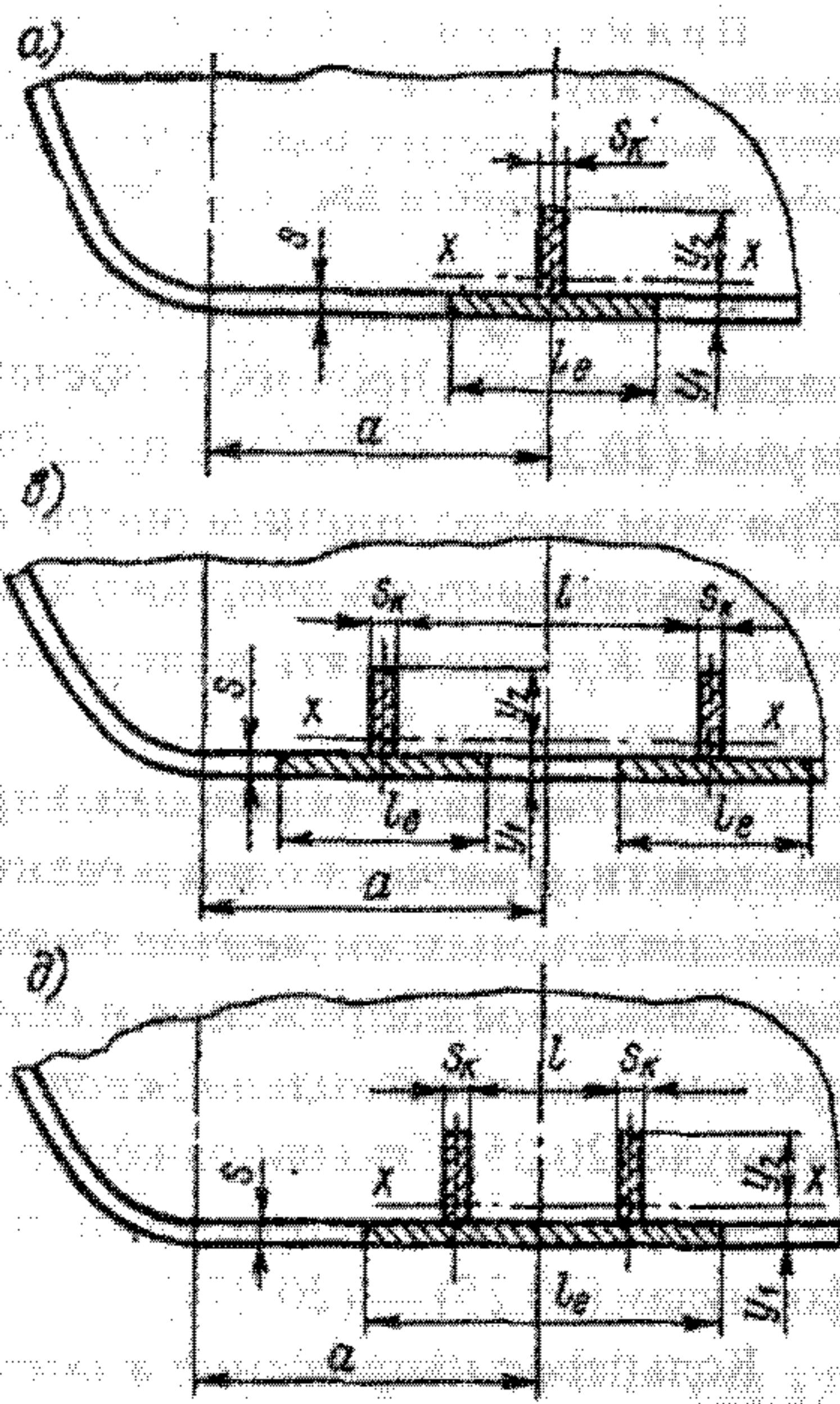


Рис. 20.18. Примеры расположения колец жесткости в корпусах аппаратов относительно седловых опор: а — внутреннее кольцо в месте опоры; б — наружное кольцо в месте опоры; в — внутренние кольца вблизи опоры; г — наружные кольца вблизи опоры; д — внутренние кольца вблизи опоры при  $l < l_e$ ; е — наружные кольца вблизи опоры при  $l < l_e$ .

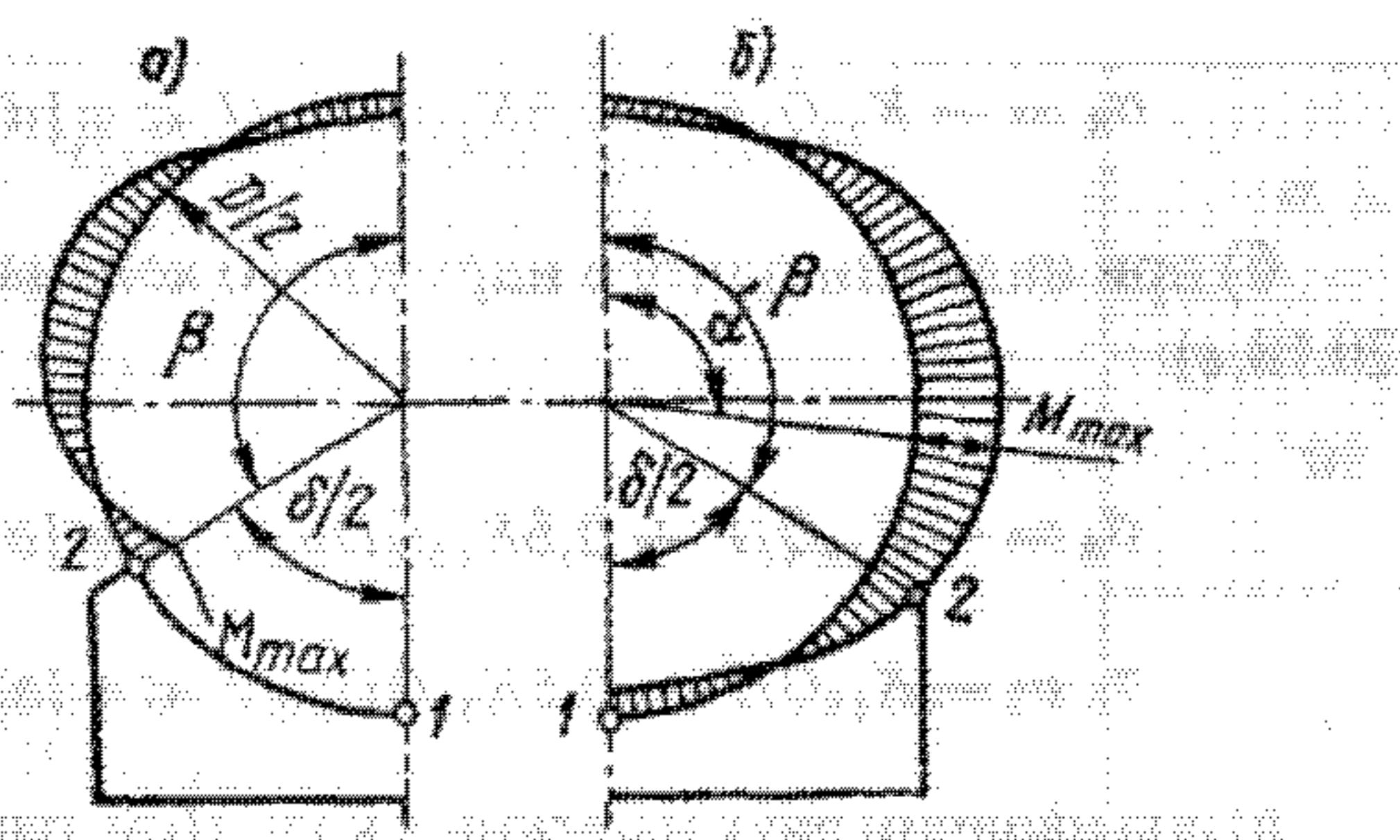


Рис. 20.19. Эпюра распределения кольцевых изгибающих моментов в опорном сечении обечаек: а — для не укрепленных колец жесткости обечаек и для обечаек по рис. 20.18, а, б, д, е; б — для обечаек, укрепленных кольцами жесткости, расположенными вблизи опоры, если расстояние между кольцами жесткости  $l_e < l < 0,5D$ , где  $K_1, K_2$  — коэффициенты, определяемые по рис. 20.17.

Напряжение растяжения в выпуклом днище

$$\sigma_3 = 2K_3 \frac{Q}{D(s-c)} + \sigma_4 < 1,25 [\sigma], \quad (20.24)$$

где  $\sigma_4$  — напряжение в днище от внутреннего давления;  $K_3$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.17.

Корпус аппарата при необходимости может быть подкреплен как внутренними, так и наружными кольцами жесткости, расположенными непосредственно над опорой или вблизи нее. Примеры рекомендуемого рас-

положения колец жесткости в корпусах аппаратов показаны на рис. 20.18, а эпюра распределения кольцевых изгибающих моментов в гладких обечайках, укрепленных кольцами жесткости, — на рис. 20.19.

**Кольцевые напряжения в опорном сечении обечайки определяются следующим образом.**

Для обечайок, не укрепленных кольцами жесткости в опорном сечении, кольцевое напряжение в нижней точке опорного сечения (точка 1 на рис. 20.19,  $\beta = \pi - \delta/2$ ) находится по формуле:

$$\sigma_{5(1)} = K_{10} \frac{Q}{(s-c) l_e} < \varphi [\sigma]. \quad (20.25)$$

Кольцевое напряжение на гребне седловой опоры (точка 2 на рис. 20.19,  $\beta = \pi - \delta/2$ ) для двух- и многоопорных аппаратов при  $L/D < 4$

$$\sigma_{5(2)} = \frac{Q}{(s-c)^2} \left[ \frac{(s-c)}{4l_e} + 1,5K_{11} \right] < \varphi [\sigma]. \quad (20.26)$$

Кольцевое напряжение в точке 2 для двухопорных аппаратов при  $L/D < 4$

$$\sigma_{5(2)} = \frac{Q}{(s-c)^2} \left[ \frac{(s-c)}{4l_e} + 6K_{11} \frac{D}{L} \right] < \varphi [\sigma]. \quad (20.27)$$

В формулах (20.25) — (20.27)  $\varphi$  — коэффициент прочности сварного шва на обечайке;  $K_{10}$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.17;  $K_n$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.20 в зависимости от угла обхвата  $\delta$  и параметра  $a/D$ ;  $l_e$  — эффективная длина обечайки в сечении над опорой, определяемая по формуле:

$$l_e = B + 1,1\sqrt{D(s - c)}, \quad (20.28)$$

но не более  $B + 30(s - c)$ , где  $B$  — ширина седловой опоры (см. рис. 20.2).

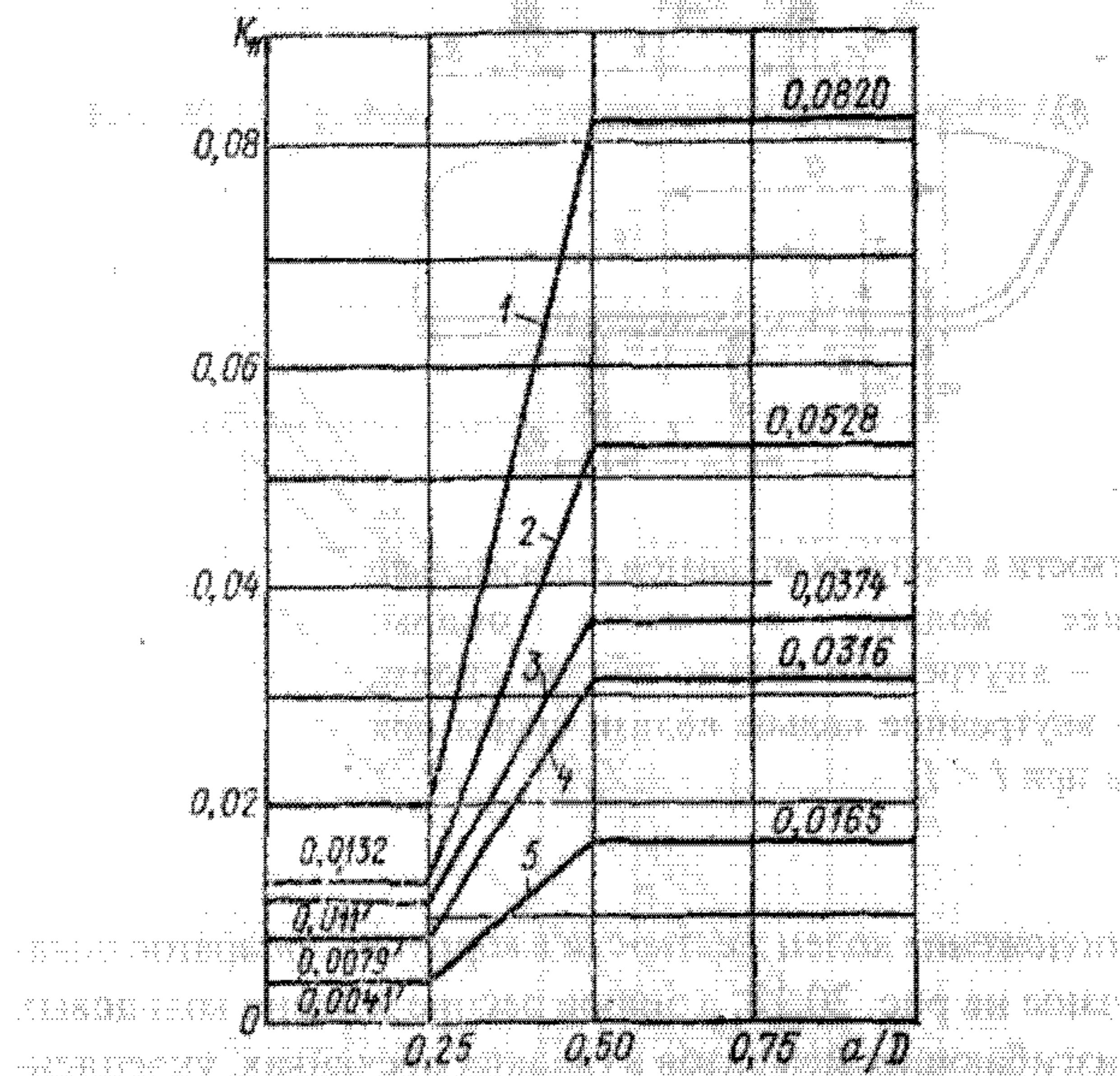


Рис. 20.20. График для определения коэффициента  $K_n$ : 1 —  $\delta = 90^\circ$ ; 2 —  $\delta = 120^\circ$ ; 3 —  $\delta = 140^\circ$ ; 4 —  $\delta = 150^\circ$ ; 5 —  $\delta = 180^\circ$ .

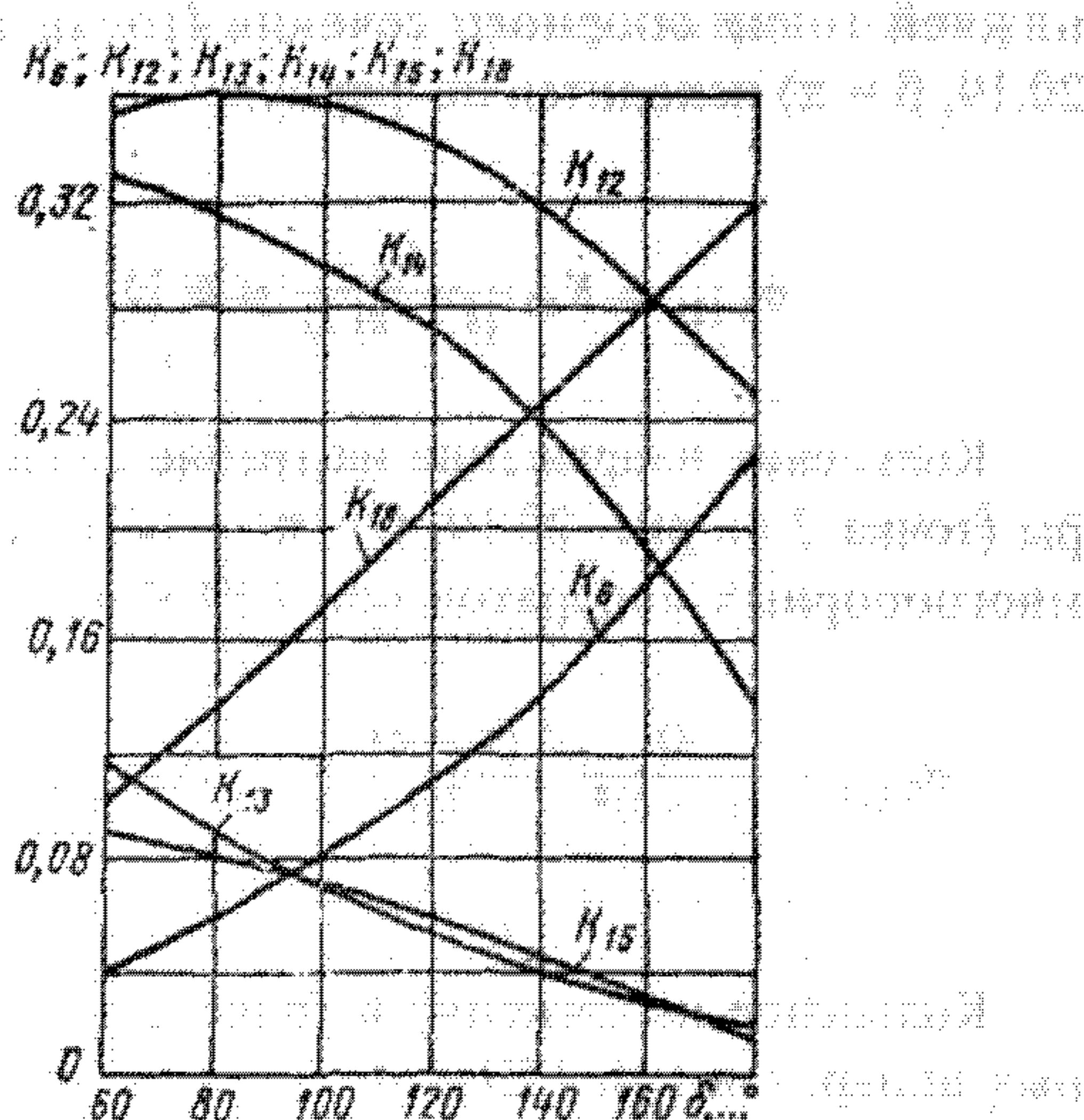


Рис. 20.21. График для определения коэффициентов  $K_6, K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{15}, K_{18}$ .

Примечание. В формулах (20.25) — (20.27) при наличии между седловой опорой и стенкой обечайки опорного листа вместо  $s$  следует подставлять суммарную толщину стенки обечайки и опорного листа, но не более  $2s$ .

В случае установки опорного листа необходимо также проверить прочность обечайки аппарата по формулам (20.25) — (20.27) за пределами опорного листа. При этом вместо ширины опоры  $B$  в формулы следует подставлять ширину опорного листа  $B_2$ , а коэффициенты  $K_{10}$  и  $K_n$  определять в зависимости от угла обхвата опорным листом  $\delta_1$ .

Расчет обечайки аппарата, укрепленной кольцами жесткости, и расчет колец жесткости при отсутствии дополнительных элементов подкрепления самих колец. Кольцевое напряжение в обечайке над опорой за пределами влияния кольца жесткости определяют по формуле (20.25). Это напряжение может быть снижено за счет установки опорного листа [см. примечание к формулам (20.25) — (20.27)].

Кольцевое напряжение в обечайке в зоне влияния кольца жесткости  $\sigma_\theta$  и кольцевые напряжения в кольце жесткости  $\sigma_K$  находят по следующим формулам:

а) при наличии одного внутреннего кольца (см. рис. 20.18, а) или двух внутренних колец при  $l \leq l_e$  (см. рис. 20.18, б)

$$\sigma_\theta = -K_{12}Q/F - 0,5K_{13}QDy_1/J \leq \varphi[\sigma]; \quad (20.29)$$

$$\sigma_K = -K_{12}Q/F + 0,5K_{13}QDy_2/J \leq \varphi[\sigma]; \quad (20.30)$$

б) при наличии одного наружного кольца (см. рис. 20.18, в)

$$\sigma_\theta = -K_{12}Q/F + 0,5K_{13}QDy_1/J \leq \varphi[\sigma]; \quad (20.31)$$

$$\sigma_K = -K_{12}Q/F - 0,5K_{13}QDy_2/J \leq \varphi[\sigma]; \quad (20.32)$$

в) при наличии двух наружных колец (см. рис. 20.18, г)

$$\sigma_\theta = -K_{14}Q/F - 0,5K_{15}QDy_1/J \leq \varphi[\sigma]; \quad (20.33)$$

$$\sigma_K = -K_{14}Q/F + 0,5K_{15}QDy_2/J \leq \varphi[\sigma]; \quad (20.34)$$

г) при наличии двух внутренних колец, расположенных на расстоянии  $l$ , удовлетворяющем соотношению  $l_e < l < 0,5D$  (см. рис. 20.18, б),

$$\sigma_\theta = -K_{14}Q/F + 0,5K_{15}QDy_1/J \leq \varphi[\sigma]; \quad (20.35)$$

$$\sigma_K = -K_{14}Q/F - 0,5K_{15}QDy_2/J \leq \varphi[\sigma]. \quad (20.36)$$

В формулах (20.29) — (20.36)  $F$  — расчетная площадь по перечному сечению обечайки;  $J$  — эффективный момент инерции площади  $F$  относительно оси  $x$  —  $x, y_1, y_2$  — расстояние от центра тяжести расчетного сечения до обечайки и кольца жесткости соответственно (см. рис. 20.18);  $K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{15}$  — коэффициенты, определяемые по рис. 20.21.

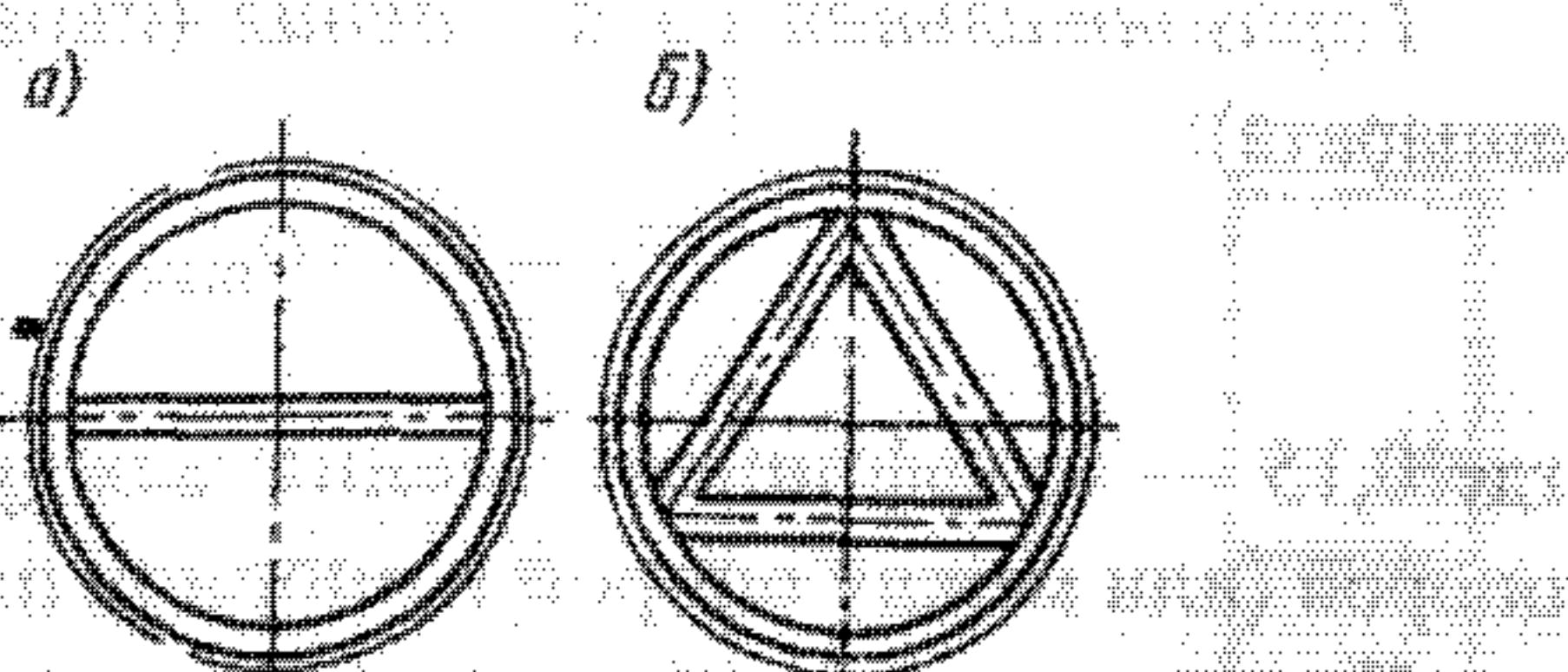


Рис. 20.22. Конструкции усиленных опорных колец жесткости:  
а — с центральным стержнем; б — с треугольной рамой.

**Расчет обечайки аппарата, укрепленной кольцами жесткости, и расчет кольца жесткости при наличии дополнительных элементов подкрепления самого кольца.** Рекомендуемые варианты усиленных опорных колец жесткости показаны на рис. 20.22.

**Условие прочности обечайки с усиленным кольцом жесткости:**

$$\sigma_b = K_{16}Q/F - 0,5K_{17}QDy_1/J < \varphi[\sigma]. \quad (20.37)$$

**Условие прочности усиленного кольца жесткости:**

$$\sigma_k = K_{18}Q/F + 0,5K_{19}QDy_2/J < \varphi[\sigma]. \quad (20.38)$$

Здесь  $K_{16}, K_{17}$  — коэффициенты, приведенные с соответствующими знаками в табл. 20.14.

**Расчет стержней усиленных колец жесткости.** Усилие в центральном горизонтальном стержне (см. рис. 20.22, а)

$$N = f_1 Q; \quad (20.39)$$

услуге в горизонтальном стержне треугольной рамы (см. рис. 20.22, б)

$$N = f_2 Q; \quad (20.40)$$

услуге в наклонных стержнях треугольной рамы (см. рис. 20.22, б)

$$N = f_3 Q; \quad (20.41)$$

Таблица 20.14

Коэффициенты  $K_{16}$  и  $K_{17}$  в формулах (20.37) и (20.38)

Конструкция усиленного кольца жесткости	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	Коэффициенты	
			$K_{16}$	$K_{17}$
С центральным горизонтальным стержнем (см. рис. 20.22, а)	60	90	-0,254	+0,0440
		120	-0,579	-0,0510
		180	-0,560	+0,0570
	90	90	-0,254	+0,0369
		120	-0,477	-0,0337
		180	-0,572	+0,0350
	120	90	-0,254	+0,0254
		120	-0,445	-0,0178
		180	-0,572	+0,0127
С треугольной рамой (см. рис. 20.22, б)	60	0	+0,144	+0,0166
		90	+0,165	-0,0079
		120	-0,616	+0,0289
		150	-0,776	-0,0148
		180	-0,787	+0,0176
	90	0	+0,156	-0,0196
		90	-0,153	-0,0100
		120	-0,558	+0,0191
		150	-0,695	-0,0020
		180	-0,734	+0,0024
	120	0	+0,161	-0,0220
		90	-0,146	-0,0110
		120	-0,499	+0,0148
		150	-0,630	-0,0004
		180	-0,674	-0,0013

Примечание. Здесь  $\alpha$  — угол обхвата аппарата опорой;  $\beta$  — угол расположения расчетных точек на обечайке.

Таблица 20.15

Коэффициенты  $f_5$ ,  $f_6$  и  $f_7$  в формулах  
(20.39) — (20.41)

$\delta, \dots$	$f_5$	$f_6$	$f_7$
60	+0,598	+0,561	-0,0982
90	+0,347	+0,440	-0,1120
120	+0,280	+0,320	-0,0752

где  $f_5$ ,  $f_6$ ,  $f_7$  — коэффициенты, приведенные в табл. 20.15.

Условие прочности стержней при  $N > 0$ :

$$N/F_{ct} \leq [\sigma]. \quad (20.42)$$

где  $F_{ct}$  — площадь поперечного сечения стержня.

Гибкость сжатых стержней определяется по формуле:

$$\lambda = 0,866 \frac{D}{r_0} \sqrt{\sigma_n/E}, \quad (20.43)$$

где  $r_0$  — минимальный радиус инерции поперечного сечения стержня; во всех случаях принимают  $\lambda \leq 4$ .

Условие устойчивости стержня при  $N < 0$ :

$$N/(\Phi_1 F_{ct}) \leq [\sigma], \quad (20.44)$$

где  $\Phi_1 = \min\{\Phi_1, \Phi_2\}$ ;  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  — коэффициенты, определяемые по рис. 13.6, а, б.

**Расчет седловой опоры.** На опору действует вертикальная сила  $Q$  (реакция опоры), горизонтальная сила  $P_1$  (перпендикулярная к оси аппарата) и горизонтальная сила трения  $P_2$  (параллельная оси аппарата).

**Реакция опоры** определяется по формулам (20.12) и (20.13), в которых учитывается максимальная сила тяжести аппарата (в том числе и при гидравлическом испытании):

а) для аппарата, установленного на двух опорах:

$$Q_{max} = 0,5G_{max}; \quad (20.45)$$

а) для аппарата, установленного на нескольких опорах:

$$Q_{max} = \psi G_{max}/z. \quad (20.46)$$

**Горизонтальная сила** (перпендикулярная к оси аппарата)

$$P_1 = K_{18} Q_{max}. \quad (20.47)$$

где  $K_{18}$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.21.

**Горизонтальная сила трения** (параллельная оси аппарата):

$$P_2 = 0,15 Q_{max}. \quad (20.48)$$

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

Площадь опорной плиты принимается конструктивно и должна удовлетворять условию

$$F_{nR} = Q_{max}/[\sigma_{bet}], \quad (20.49)$$

где  $[\sigma_{bet}]$  — допускаемое напряжение сжатия бетона фундамента, принимаемое в зависимости от марки бетона (СНиП В-1—62):

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

В случае, если принятая площадь опорной плиты  $F_{nR} > F_{nR}$ , напряжение сжатия бетона определяют по формуле:

$$\sigma_{bet} = [\sigma_{bet}] F_{nR}/F_{nR}. \quad (20.50)$$

**Расчетная толщина опорной плиты**

$$s_{nR} = 2,45b \sqrt{K_{18}\sigma_{bet}/(1,1[\sigma_n])}. \quad (20.51)$$

где  $K_{18}$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.23 в зависимости от отношения  $b/a$ ;  $b$  — ширина поперечных ребер;  $a$  — расстояние между поперечными ребрами (рис. 20.24);  $[\sigma_n]$  — допускаемое напряжение для материала опорной плиты.

**Исполнительная толщина опорной плиты**

$$s_n = s_{nR} + c; \quad (20.52)$$

во всех случаях  $s_n \geq 10$  мм.

**Расчетная толщина ребра**  $l$  (рис. 20.24) из условия прочности на изгиб и растяжение определяется по формуле:

$$s_{PR} \geq 42P_1/(1,1[\sigma]D). \quad (20.53)$$

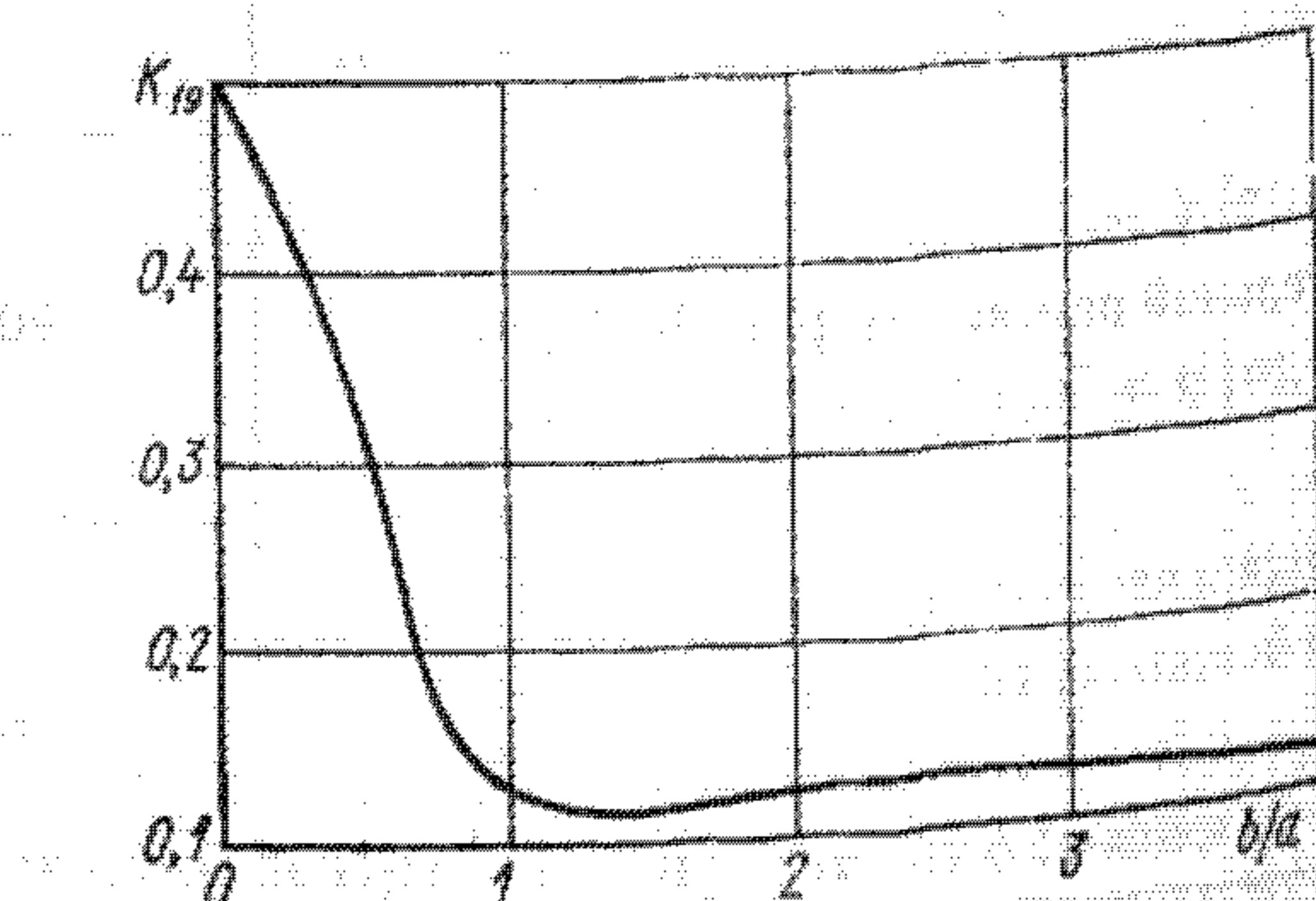


Рис. 20.23. График для определения коэффициента  $K_{18}$

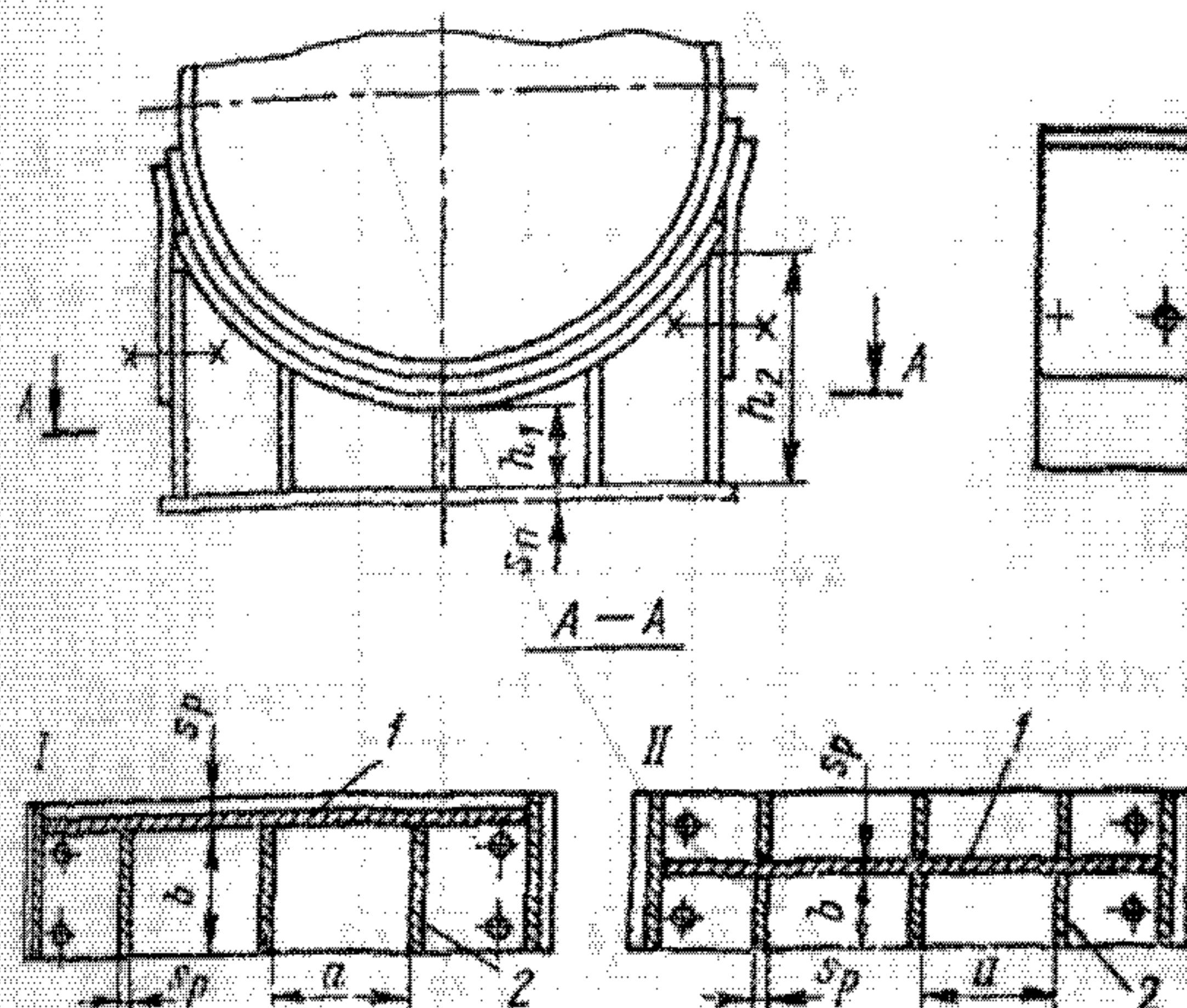


Рис. 20.24. Конструктивные элементы седловой опоры:  
I — с поперечными ребрами 2, расположенным по одну сторону продольного ребра 1; II — с поперечными ребрами 2, расположенным симметрично по обе стороны продольного ребра 1.

Толщины ребер 1 и 2 (рис. 20.24) проверяют на устойчивость от действия сжимающей нагрузки  $q$ . Нагрузка на единицу длины ребра

$$q = 1,2Q_{\max}/l_{\text{общ}}. \quad (20.54)$$

Здесь  $l_{\text{общ}}$  — общая длина всех ребер на опоре:

а) для опоры с расположением ребер по схеме I (рис. 20.24)

$$l_{\text{общ}} = a(m - 1) + bm; \quad (20.55)$$

б) для опор с расположением ребер по схеме II

$$l_{\text{общ}} = a(m - 1) + 2bm. \quad (20.56)$$

где  $m$  — число ребер на опоре.

Расчетная толщина ребер из условия устойчивости

$$s_{pr} \geq q/[\sigma_{kp}], \quad (20.57)$$

где  $[\sigma_{kp}]$  — допускаемое напряжение на устойчивость, принимаемое из условия

$$[\sigma_{kp}] = \min \{\sigma_t/3; \sigma_{kp}/5\}. \quad (20.58)$$

Критическое напряжение находят по формуле:

$$\sigma_{kp} = 3,6E(s_{pr}/h_1)^2, \quad (20.59)$$

где  $s_{pr}$  — большее из значений  $s_{pr}$ , найденных по формулам (20.53) и (20.57);  $h_1$  — высота крайнего наружного ребра (рис. 20.24).

Условие прочности опоры при действии изгибающей силы  $P_2$

$$\sigma = P_2 h_1/W < \phi [\sigma]; \quad (20.60)$$

в случае приварной опоры

$$\sigma = 0,5P_2(h_1 + h_2)/W < \phi [\sigma], \quad (20.61)$$

где  $W$  — момент сопротивления горизонтального сечения по ребрам у основания опоры (на рис. 20.24 — заштрихованное сечение ребер);  $h_1$  — высота среднего ребра опоры.

## 20.4. Расчет опор колонных аппаратов на ветровую нагрузку и сейсмические воздействия, ГОСТ Р 51274—99

Толщину стенок цилиндрического кориуса, конических переходов и днищ определяют по данным гл. 13 исходя из внутреннего избыточного или наружного давления.

Толщину цилиндрической стенки опоры исходя из совместного действия осевой нагрузки на нее, силы тяжести аппарата, его среды и опирающихся на него внешних устройств (трубопроводов, площадок, лестниц, изоляции и др.), изгибающих моментов от ветровых и эксцентрических нагрузок, а также от сейсмического воздействия для районов с сейсмичностью более 7 баллов (при 12-балльной шкале) определяют по данным настоящей главы.

Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровой нагрузки и сейсмических воздействий проводят по ГОСТ Р 51273—99.

**Область применения расчетных формул.** Расчету на ветровую нагрузку подлежат все колонные аппараты, устанавливаемые на открытой площадке, если их высота  $H > 10$  м и  $H \geq 1,5D_{\text{ши}}$ , где  $D_{\text{ши}}$  — наименьший из наружных диаметров аппарата. Расчет проводится отдельно на рабочие условия, условия испытания и условия монтажа.

Расчетная схема аппарата принимается в виде консольного упругого защемленного стержня (рис. 20.25).

Аппарат по высоте  $H$  разбивают на  $z$  участков.

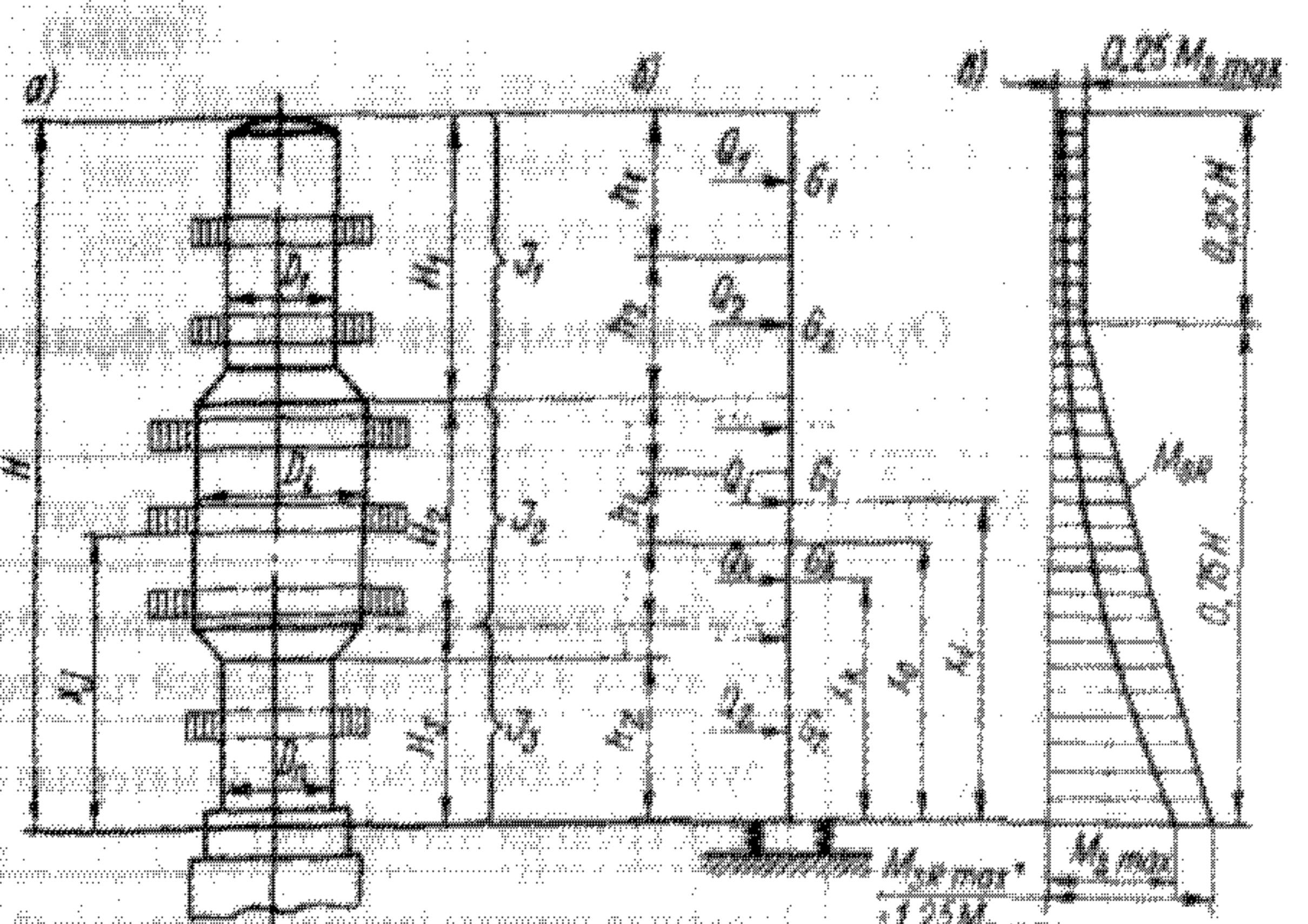


Рис. 20.25. Расчетная схема колонного аппарата при определении ветровых нагрузок и сейсмических воздействий: а — схема аппарата; б — схема ветровых нагрузок; в — эпюра изгибающих моментов от сейсмических воздействий

Но во всех случаях высота участка  $h \leq 10$  м (рис. 20.25, б). Силу тяжести каждого участка  $G_i$  принимают сосредоточенной в середине участка. Ветровую нагрузку, действующую по высоте аппарата, заменяют сосредоточенными силами  $Q_i$ , действующими в горизонтальном направлении и приложенными в серединах участков. Сейсмические силы прикладываются также горизонтально в серединах участков.

**Определение периода собственных колебаний.** Период основного тона собственных колебаний аппарата постоянного сечения с приблизительно равномерно распределенной по высоте массой, с

$$T = T_0 \sqrt{1 + 4EJ/(HC_F J_F)} . \quad (20.62)$$

Здесь  $J$  — момент инерции верхней части основного металлического сечения аппарата относительно центральной оси,  $\text{м}^4$ ;  $J_F$  — минимальный момент инерции площади подошвы фундамента,  $\text{м}^4$ ;  $C_F$  — коэффициент неравномерности сжатия грунта,  $\text{Н}/\text{м}^3$ , определяемый по данным инженерной геологии (при отсутствии таких данных  $C_F$  выбирают по табл. 20.16);  $T_0$  — величина, определяемая по формуле:

$$T_0 = 1.8H \sqrt{mH/(EJ)} , \quad (20.63)$$

где  $m$  — общая масса аппарата.

При отсутствии данных о фундаменте в первом приближении допускается принимать  $T = T_0$ .

Период основного тона собственных колебаний аппарата переменного сечения (по диаметру и толщине стенки корпуса), с

$$T = 2\pi H \left( \sum_{i=1}^n G_i \alpha_i^2 \right)^{1/2} \left[ g \left( \frac{H}{2EJ_1} \nu + \frac{1}{C_F J_F} \right) \right]^{-1/2} . \quad (20.64)$$

#### Ориентировочные значения коэффициента неравномерности сжатия грунта

№ п/п	Грунт	$C_F, \text{МН}/\text{м}^3$
1	Слабые грунты (материал и шлам в пластичном состоянии, пылевой песок в состоянии средней плотности)	60
2	Грунты средней плотности (материал и шлам на границе текучести и песок средней плотности)	60—100
3	Плотные грунты (твердый глинистый шлам, гравий и гравийный песок, плотный лёсс)	100—200
4	Скальные грунты	200

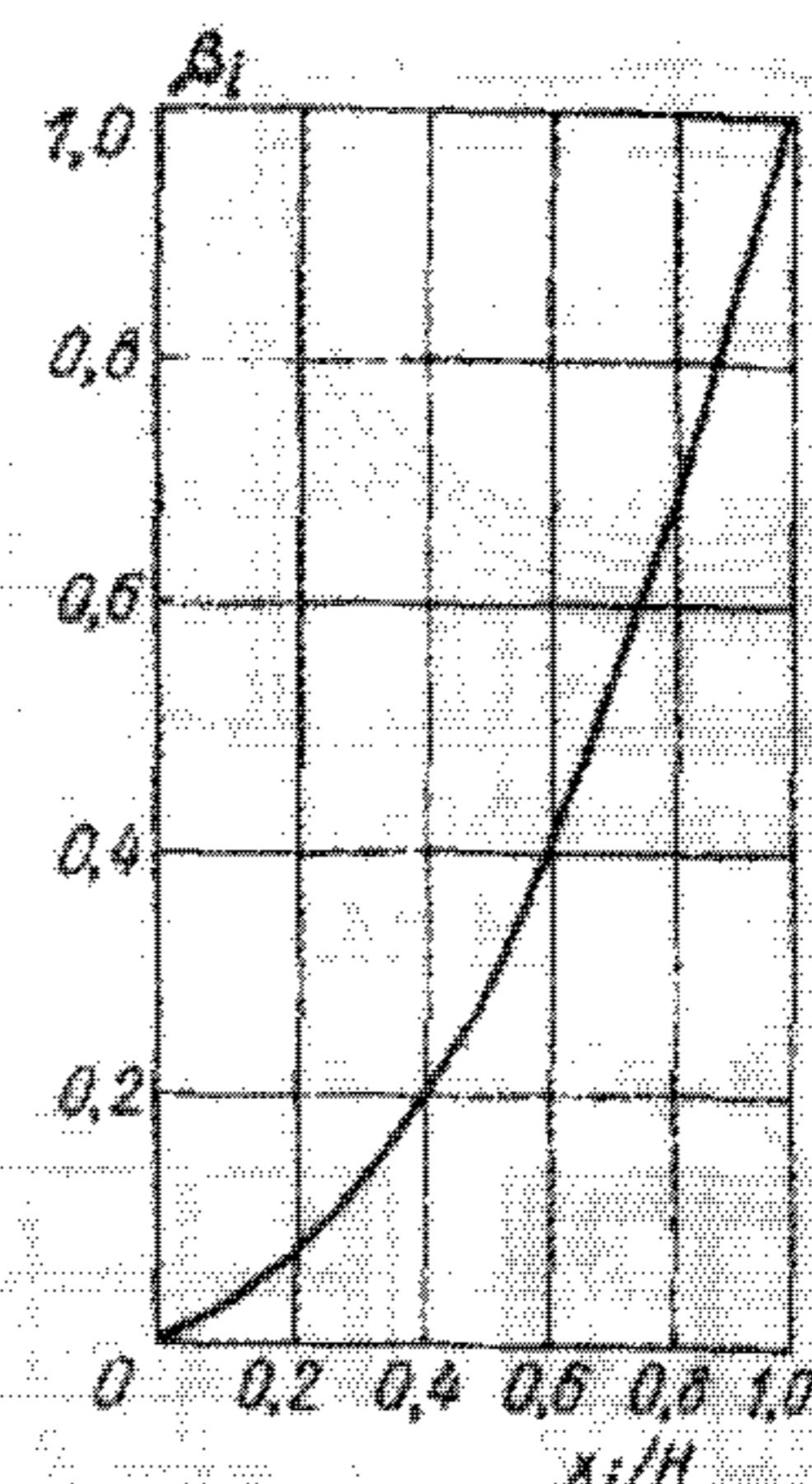


Рис. 20.26. Коэффициент  $\beta_1$

Здесь  $J_1$  — момент инерции площади поперечного сечения части аппарата диаметром  $D_1$  и высотой  $H$  (см. рис. 20.25, а);  $\alpha_i$  — относительное перемещение центров тяжести участков,  $1/(H \cdot m)$

$$\alpha_i = \nu \frac{H}{2EJ_1} \beta_1 + \frac{x_i}{H C_F J_F} , \quad (20.65)$$

где  $\beta_1$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.26;  $x_i$  — расстояние от поверхности земли до центра тяжести рассматриваемого  $i$ -го участка (см. рис. 20.25, б).

Коэффициент  $\nu$ , входящий в формулы (20.64) и (20.65), определяют по следующей формуле:

$$\nu = -\frac{2}{H^3} \left[ H_1^3 (\Delta + \lambda) + H_2^3 \mu + 2 \frac{J_1}{J_3} H_1 H_2 H_3 \right] , \quad (20.66)$$

где  $H_1, H_2, H_3, J_1, J_3$  — высоты и моменты инерции площади поперечного сечения частей аппарата (см. рис. 20.25, а);  $\Delta, \lambda, \mu$  — коэффициенты, определяемые по рис. 20.27 или вычисляемые по формулам:

Таблица 20.16

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= \frac{1}{3} + \frac{J_1}{J_2} \frac{H_2}{H_1} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 + \frac{H_2}{H_1} + 1 \right]; \\ \lambda &= \frac{J_1}{J_2} \frac{H_2}{H_1} \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^2 + \frac{H_2}{H_1} + 1 \right]; \\ \mu &= \frac{J_2}{J_1} \frac{H_2}{H_1} \left( \frac{H_2}{H_1} + 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (20.67)$$

Для аппаратов с двумя переменными жесткостями  $J_1$  и  $J_2$  в формулах (20.66) и (20.71) следует принимать  $H_2 = 0$ , то же при определении коэффициентов  $\Delta$ ,  $\lambda$ , и  $\mu$  по рис. 20.27.

Общий период колебаний для групп аппаратов, установленных на общем фундаменте и жестко связанных в горизонтальном направлении площадками для обслуживания, с

$$T = 3,63 \left( \sum_{N=1}^N G_N H_N^3 \right)^{1/2} \times (g C_F J_P)^{-1/2}, \quad (20.68)$$

где  $G$  — вес  $N$ -го аппарата;  $H$  — высота  $N$ -го аппарата;  $N$  — число аппаратов.

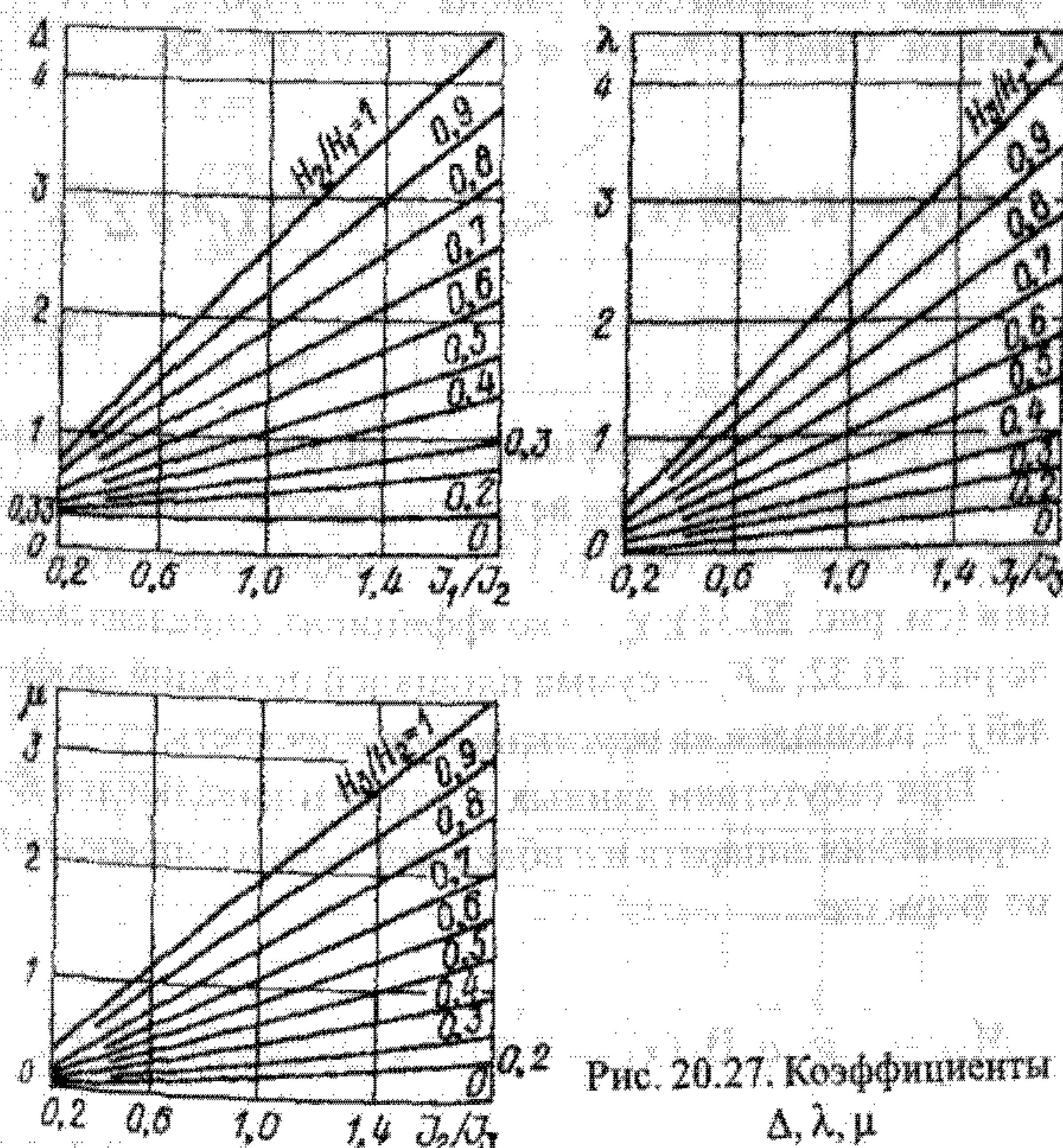


Рис. 20.27. Коэффициенты  $\Delta, \lambda, \mu$

**Определение изгибающего момента от ветровой нагрузки.** Изгибающий момент от ветровой нагрузки в расчетном сечении аппарата на высоте  $x_0$  от поверхности земли (см. рис. 20.25, б)

$$M_o = \sum_{i=1}^n Q_i (x_i - x_0) + \sum_{j=1}^m M_{oj}, \quad (20.69)$$

где  $n$  — число участков аппарата над расчетным сече-

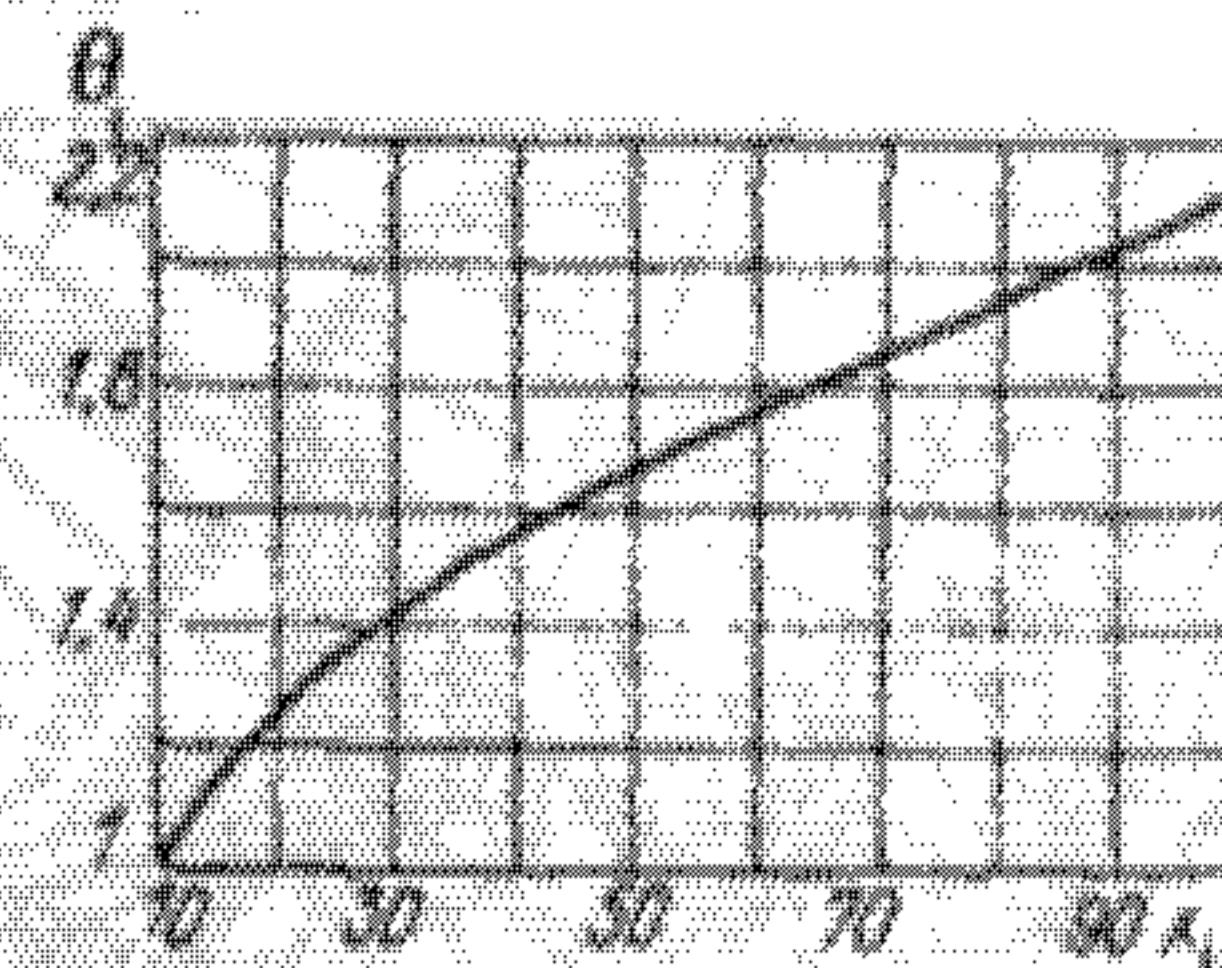


Рис. 20.28. Коефициенты  $\theta$

нием;  $m$  — число площадок над расчетным сечением аппарата;  $M_{oj}$  — изгибающий момент от действия ветра на  $j$ -ю обслуживающую площадку, расположенную на высоте  $x_j$ , Н·м.

Ветровая нагрузка на  $i$ -м участке аппарата

$$Q_i = Q_{i,\text{ст}} + Q_{i,\text{дин}}, \quad (20.70)$$

где  $Q_{i,\text{ст}}$ ,  $Q_{i,\text{дин}}$  — статическая (средняя) и динамическая (пульсационная) составляющие ветровой нагрузки на  $i$ -м участке;

$$Q_{i,\text{ст}} = q_{i,\text{ст}} D_i h_i; \quad Q_{i,\text{дин}} = q_{i,\text{ст}} D_i h_i; \quad (20.71)$$

В формуле (20.71)  $D_i$  — наружный диаметр  $i$ -го участка аппарата (если имеется изоляция, то наружный диаметр изоляции);  $q_{i,\text{ст}}$  — нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки на середине  $i$ -го участка, Па

$$q_{i,\text{ст}} = q_0 \theta K, \quad (20.73)$$

где  $q_0$  — нормативный скоростной напор ветра на высоте 10 м над поверхностью земли (табл. 20.27);  $\theta = (0,1x)^{0,31}$  — коэффициент, учитывающий изменение скоростного напора ветра по высоте аппарата (рис. 20.28);  $K$  — аэродинамический коэффициент (табл. 20.18).

На рис. 20.29 приведена карта стран СНГ с указанием границ географических районов для определения скоростных напоров и сейсмических районов.

Таблица 20.17

#### Нормативный скоростной напор ветра

(СНиП 2.01.07—85)

Район территории СНГ	$q_0$ , Па
Ia	170
I	230
II	300
III	380
IV	480
V	600
VI	790
VII	850

Примечание. Район установки аппарата определяет заказчик в техническом задании.



Рис. 20.29. Карта СНГ с указанием географических районов для определения скоростных напоров ветра (римскими цифрами указаны географические районы); — — — граница географического района; О — города; ППП — граница сейсмического района. (Более точные границы районов см. СНиП II-7-81) и СНиП 2.01.07-85).

В формуле (20.72)  $v$  — коэффициент, учитывающий пульсацию скорости ветра, определяемый по зависимости  $v = 0,968 - 0,025 \cdot H \cdot \sqrt{\dots}$

$\xi$  — коэффициент динаминости при ветровой нагрузке, определяемый в зависимости от безразмерного параметра  $\epsilon$  по рис. 20.30;  $\eta_i$  — приведенное относительное ускорение центра тяжести  $i$ -го участка,

$$\eta_i = \alpha_i \left( \sum_{k=1}^i \alpha_k m_k Q_{k,ct} \right) \left( \sum_{k=1}^i \alpha_k^2 G_k \right), \quad (20.74)$$

где  $\alpha_i, \alpha_k$  — относительные перемещения центра тяжести  $i$ -го и  $k$ -го участков при основном тоне колебаний, определяемые по формуле (20.65);  $G_k$  — сила тяжести  $k$ -го участка;  $m_i = 0,76 (0,1x_i)^{0,15}$  — коэффициент пульсации скоростного напора ветра для середины  $i$ -го участка, принимаемый по рис. (20.31).

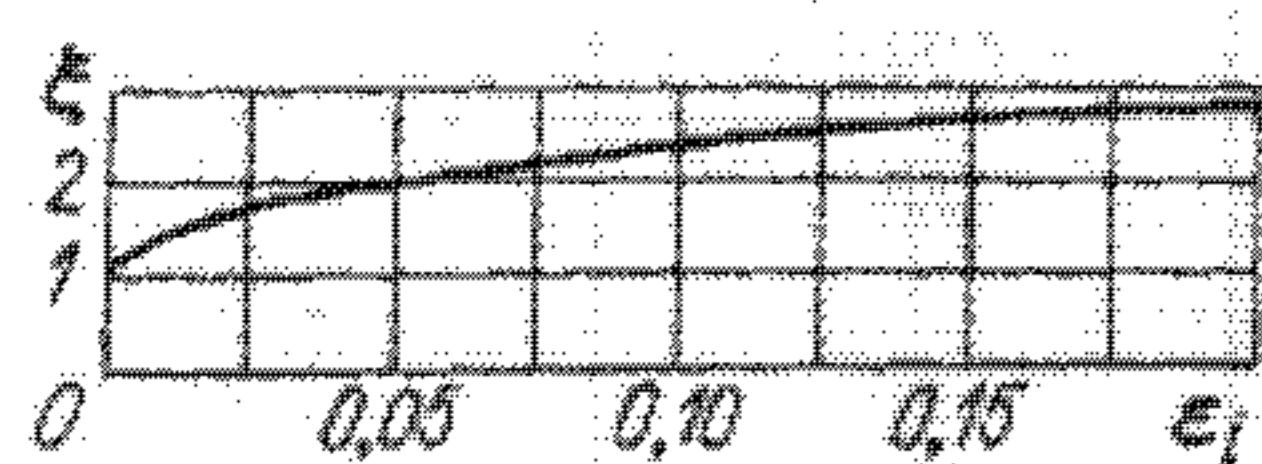


Рис. 20.30. Коэффициент динаминости  $\xi$

Изгибающий момент в расчетном сечении аппарата (на высоте  $x_0$  — см. рис. 20.25, б) от действия ветра на  $j$ -ю площадку для обслуживания рассчитывается по формуле:

$$M_{v,j} = K q_0 \Theta_j (x_j - x_0) (1 + 0,75 \xi_j m_j) \sum F_j, \quad (20.75)$$

где  $\Theta_j = (0,1x_j)^{0,14}$  — коэффициент, учитывающий изменение скоростного напора ветра по высоте аппарата (см. рис. 20.28);  $m_j = 0,76 (0,1x_j)^{0,15}$  — коэффициент пульсации (см. рис. 20.31);  $\chi_j$  — коэффициент, определяемый по рис. 20.32;  $\sum F_j$  — сумма площадей проекций профилей  $j$ -й площадки на вертикальную плоскость.

При отсутствии данных о форме площадки для обслуживания аппарата изгибающий момент определяют по формуле:

$$M_{v,j} = K q_0 \Theta_j (x_j - x_0) (1 + 0,75 \xi_j m_j) \sum F'_j, \quad (20.76)$$

где  $F'_j$  — площадь проекции участка аппарата в месте расположения площадки, включая последнюю, на вертикальную плоскость.

**Определение расчетных усилий от сейсмических воздействий.** Расчету на сейсмические воздействия подлежат все вертикальные аппараты, устанавливаемые в районах с сейсмичностью не менее 7 баллов (по 12-балльной шкале), независимо от того, находятся они в помещении или на открытой площадке.

Таблица 20.18

## Аэродинамический коэффициент

Элемент аппарата	$K$
Корпус цилиндрический	0,7
Корпус цилиндрический с обслуживающими площадками (учитывается проекция площадки на вертикальную плоскость)	0,85
Только площадки для обслуживания аппарата (учитывается сумма всех проекций площадей профилей площадки на вертикальную плоскость)	1,4

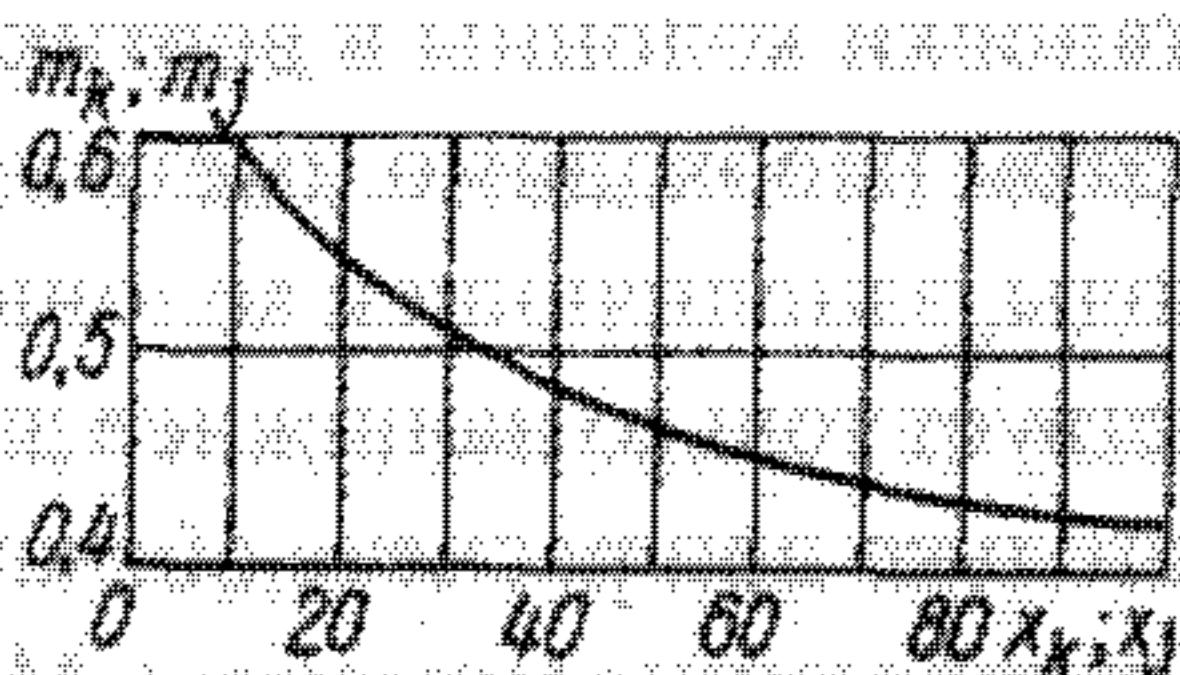
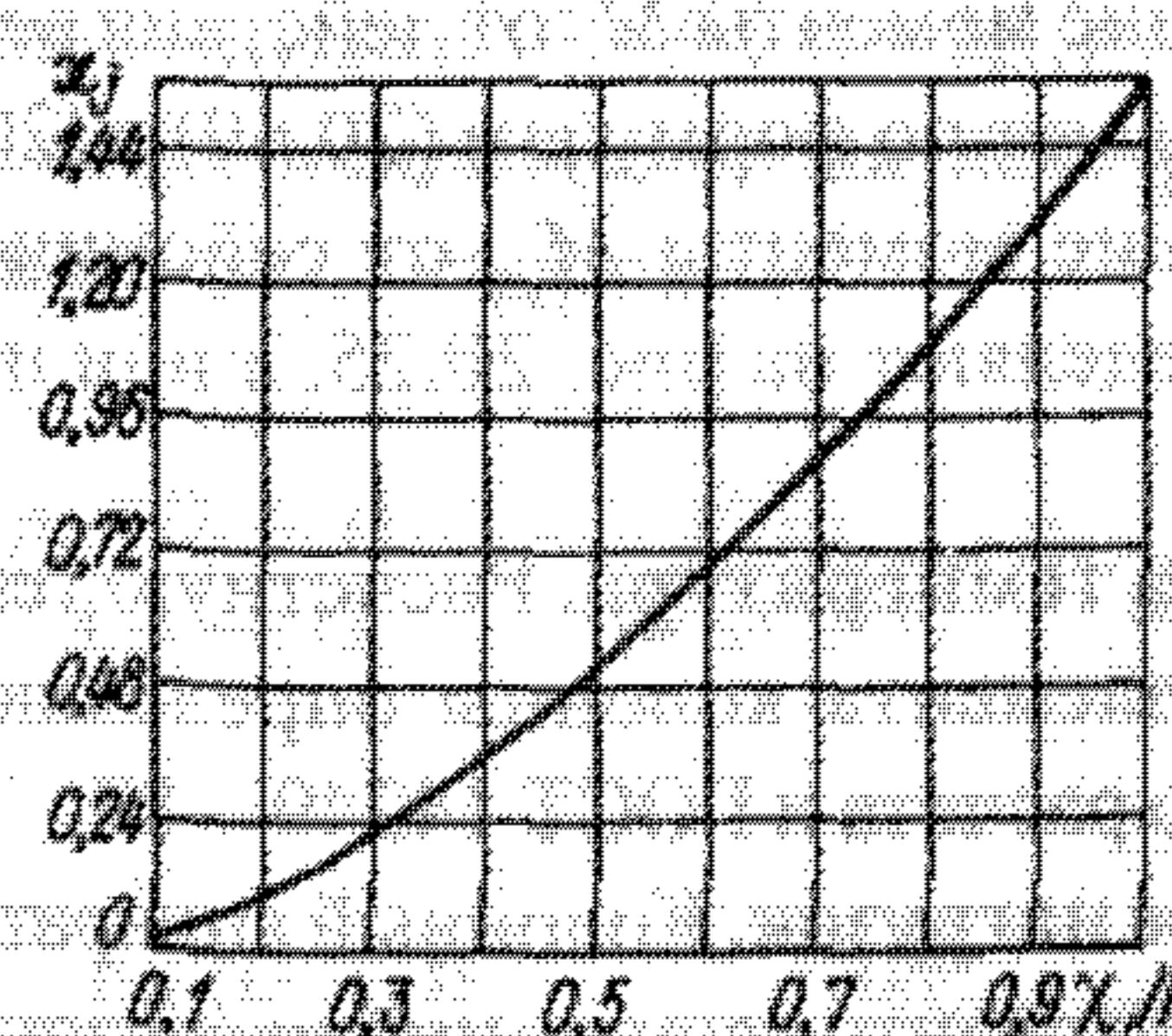
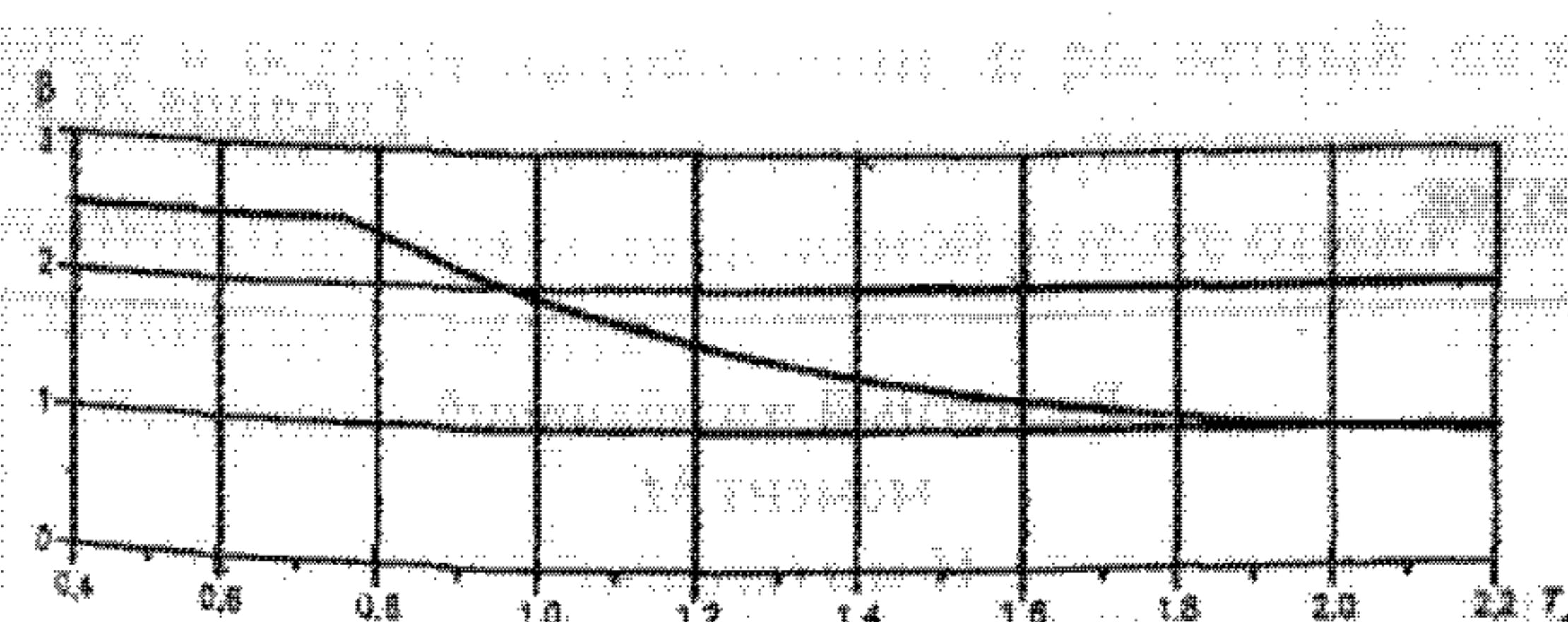
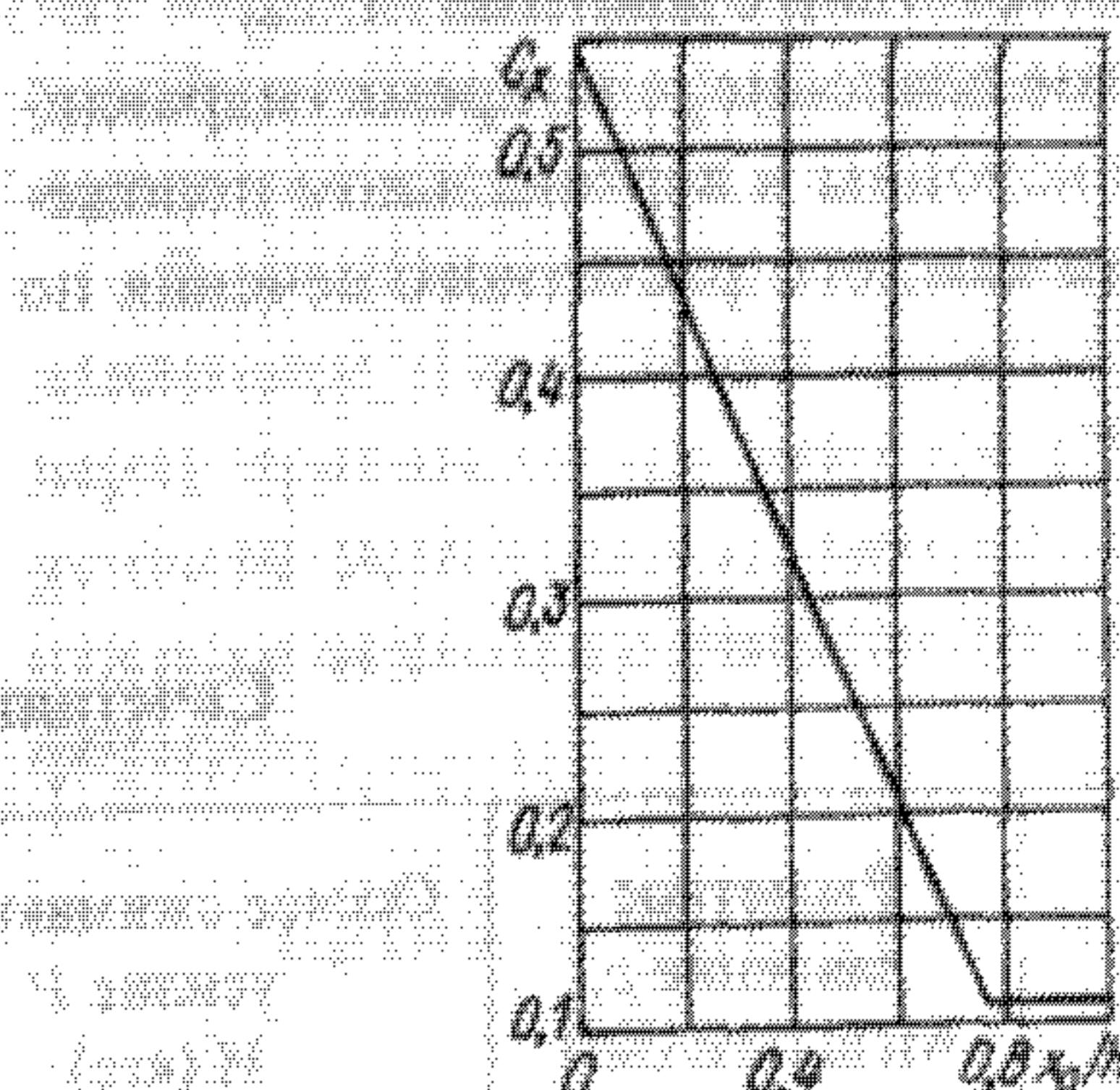


Рис. 20.31. Коэффициенты пульсации

Рис. 20.32. Коэффициент  $\chi$ Таблица 20.19  
Сейсмический коэффициент  $K_s$  (СНиП II-7—81)

Расчетная сейсмичность, баллы	$K_s$
7	0,1
8	0,2
9	0,4

Рис. 20.33. Коэффициент динаминости  $\beta$ Рис. 20.34. Коэффициент  $C_s$

Расчетную сейсмическую силу в середине  $i$ -го участка соответствующую первому тону собственных колебаний аппарата определяют по формуле:

$$Q_{si} = 0,375 K_s \beta G_1 \alpha_i \left( \sum_{k=1}^s G_k \alpha_k \right) \left( \sum_{k=1}^s G_k \alpha_k^2 \right)^{-1}, \quad (20.77)$$

где  $K_s$  — сейсмический коэффициент (табл. 20.19);  $\beta$  — коэффициент динамичности при сейсмической нагрузке (рис. 20.33) или по зависимости  $\beta = 1,9/T$ , но во всех случаях не менее 0,8 и не более 2,5;  $\alpha_i$ ,  $\alpha_k$  — коэффициенты, определяемые по формуле (20.65).

Максимальный изгибающий момент от сейсмических воздействий в нижнем сечении аппарата при учете только первой формы колебаний

$$M_{s, \max} = \sum_{i=1}^s Q_{si} x_i. \quad (20.78)$$

В качестве первого приближения расчетный изгибающий момент  $M_{s, \max}$  в сечении аппарата на расстоянии  $x_0$  от поверхности земли с учетом влияния высших форм колебаний определяется в зависимости от  $M_{s, \max}$  по эпюре изгибающих моментов (см. рис. 20.25, в).

## Общие расчетные нагрузки и расчетная температура

**Расчетное давление.** Расчетное давление  $p_r$  в рабочих условиях для каждого расчетного сечения и пробное давление  $p_{pr}$ , измеряемое в верхней части колонны, устанавливают в соответствии с данными гл. 12.

Гидростатическое давление  $p_g$  во время гидравлического испытания колонны в вертикальном положении определяют для каждого расчетного сечения по формуле:

$$p_r = \gamma (H - x_0), \quad (20.79)$$

где для воды  $\gamma = 10^4 \text{ Н/м}^3$ .

При расчете колонн должны быть учтены следующие весовые нагрузки:  $G_1$  — сила тяжести колонны в рабочих условиях, включая площадки для обслуживания, изоляцию, внутренние устройства и рабочую пророду,  $H$ ;  $G_2$  — сила тяжести колонны при гидравлическом испытании, включая жидкость, заполняющую колонну,  $H$ ;  $G_3$  — максимальная нагрузка колонны от собственного веса в условиях монтажа (после установки колонны в вертикальное положение),  $H$ ;  $G_4$  — минимальная нагрузка колонны от собственного веса в условиях монтажа (после установки колонны в вертикальное положение),  $H$ . При этом необходимо иметь в виду, что нагрузка от веса воды, заполняющей колонну в условиях испытания, действует только на нижнее днище и должна учитываться только при расчете обечайки опоры.

**Расчетные изгибающие моменты.** Максимальный изгибающий момент  $M_G$  от действия эксцентрических приложенных весовых нагрузок, в том числе от присоединяемых трубопроводов, определяют для каждого расчетного сечения.

Изгибающие моменты  $M_v$  от действия ветровых нагрузок определяют по формулам (20.69) и (20.75).

Изгибающие моменты  $M_{s, \max}$  от сейсмических воздействий определяют на рис. 20.25, в или по формуле (20.78).

**Расчетная температура.** Расчетную температуру для каждого элемента колонны определяют по данным теплового расчета и ГОСТ 14249—89.

**Сочетание нагрузок.** Колонный аппарат рассчитывают для трех вариантов сочетаний нагрузок для рабочих условий для условий гидравлического испытания при вертикальном положении колонны; для условий монтажа (табл. 20.21).

Таблица 20.21

### Сочетание нагрузок

Условия	Расчетное давление $p_r$ , МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Осьвое сжимающее усилие $P$ , Н (кгс)	Расчетный изгибающий момент $M$ , Н·мм (кгс·см)
Рабочее условие	$p_1$	$P_1 = G_1$	$M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ Для сейсмических районов принимают большее из значений: $M_1 = M_{G1} + M_{\nu1}$ $M_1 = M_{G1} + M_{R1}$
Условие испытаний	$p_2$	$P_2 = G_2$	$M_2 = M_{G2} + 0,6M_{v2}$
Условие монтажа	0	$P_3 = G_3$ Для анкерных болтов $P_3 = G_4$	$M_3 = M_{G3} + M_{v3}$ Для сейсмических районов принимают большее из значений: $M_3 = M_{G3} + M_{\nu3}$ $M_3 = M_{G3} + M_{R3}$

Если во время эксплуатации в исключительных (аварийных) случаях возможно заполнение колонны рабочей жидкостью, то необходимо рассчитать колонну и для этого случая. Расчетные нагрузки определяют так же, как и для условий испытания.

Проверочный расчет корпуса колонны. Расчетными сечениями колонного аппарата являются:

- 1) нижние поперечные сечения каждой части корпуса, имеющей разные диаметры или толщины стенок;
- 2) поперечное сечение корпуса в месте присоединения к нему обечайки опоры;
- 3) сварной шов в месте присоединения обечайки опоры к корпусу;
- 4) поперечное сечение обечайки опоры в месте наибольших вырезов;
- 5) поперечное сечение основания обечайки опоры.

Для аппаратов, имеющих по высоте постоянные диаметры и толщину стенки корпуса, расчетными сечениями являются только поперечные сечения корпуса в месте присоединения к нему обечайки опоры и указанные сечения опоры.

Расчетные сечения корпуса проверяют на напряжения в них для рабочих условий ( $P = P_1; M = M_1; p = p_R$ ) или условий монтажа ( $P = P_1; M = M_1; p = 0$ ).

Продольные напряжения на наветренной ( $\sigma_{x1}$ ) и подветренной ( $\sigma_{x2}$ ) сторонах:

$$\sigma_{x1} = \frac{p_R(D+s)}{4(s-c)} - \frac{P_{1x0}}{\pi D(s-c)} + \frac{4M_{x0}}{\pi D^2(s-c)}; \quad (20.80)$$

$$\sigma_{x2} = \frac{p_R(D+s)}{4(s-c)} - \frac{P_{1x0}}{\pi D(s-c)} - \frac{4M_{x0}}{\pi D^2(s-c)}, \quad (20.81)$$

где  $P_{1x0}, M_{x0}$  — расчетная сжимающая сила, действующая в осевом направлении, и расчетный изгибающий момент в соответствующем расчетном сечении колонного аппарата на заданной высоте относительно подошвы фундамента.

Кольцевые напряжения

$$\sigma_y = p_R(D+s)/[2(s-c)]. \quad (20.82)$$

Эквивалентные напряжения на наветренной ( $\sigma_{e1}$ ) и подветренной ( $\sigma_{e2}$ ) сторонах:

$$\sigma_{e1} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1}\sigma_y + \sigma_y^2}; \quad (20.83)$$

$$\sigma_{e2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2}\sigma_y + \sigma_y^2}. \quad (20.84)$$

(если  $\sigma_{x1}, \sigma_{x2} < 0$ , то  $\Phi = 1$ );

Условия прочности корпуса для каждого расчетного сечения проверяются по формулам:

а) на наветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{x1}|; |\sigma_{x2}|\} \leq [\sigma_x]\Phi, \quad (20.85)$$

(если  $\sigma_{x1} < 0$ , то  $\Phi = 1$ );

б) на подветренной стороне

$$\max\{|\sigma_{e1}|; |\sigma_{e2}|\} \leq [\sigma_x]\Phi, \quad (20.86)$$

(если  $\sigma_{x1} < 0$ , то  $\Phi = 1$ ).

В формулах (20.83) — (20.86)  $\Phi$  — коэффициент прочности сварного шва на корпусе колонны.

Условие устойчивости корпуса проверяют для каждого расчетного сечения для рабочих условий, а также для условий испытаний и монтажа.

Для аппаратов, работающих под внутренним избыточным давлением и без давления, условие устойчивости проверяют по формуле:

$$P_1/[P_1] + M/[M] \leq 1. \quad (20.87)$$

Значения  $[P]$  и  $[M]$  определяют по данным гл. 13 (ГОСТ 14249—89) соответственно для рабочих условий, условий испытания и монтажа.

Если толщина стенки обечайки опоры меньше или равна толщине стенки корпуса в месте присоединения к нему обечайки опоры и механические свойства материала обечайки опоры не выше соответствующих свойств материала корпуса, то расчет корпуса не проводят, а проверяют прочность и устойчивость только обечайки опоры, являющейся основным элементом.

Для аппаратов, работающих под наружным давлением, для условий испытания и монтажа проверку производят по формуле (20.87). Для рабочих условий устойчивость необходимо проверять для каждого основного расчетного сечения колонны по формуле:

$$p_y/[p] + P_1/[P_1] + M/[M] \leq 1, \quad (20.88)$$

где  $[p], [P_1]$  и  $[M]$  определяют по данным гл. 13 (ГОСТ 14249—89) для рабочих условий.

Расчет элементов опоры колонных аппаратов.

Конструктивные элементы опор колонных аппаратов показаны на рис. 20.35, а узел соединения опоры с обечайкой колонны на рис. 20.36.

Расчет проводится для рабочих условий и для условий гидравлического испытания колонны. Используются расчетные нагрузки в трех сечениях опоры:  $x-x$  — в основании опоры;  $y-y$  — в месте сварного соединения опоры с корпусом аппарата;  $z-z$  — по центрам отверстий в опоре.

На опору действуют:  $P = G$  — осевая сжимающая нагрузка от силы тяжести аппарата и среды, вспомогательные

тельных устройств, установленных на колонне, изоляции;  $M$  — суммарный изгибающий момент от ветровой и сейсмической нагрузок и от эксцентрично приложенных к оси аппарата сил тяжести отдельных внут-

ренних и внешних устройств. Определение  $P$  и  $M$  по табл. 20.21.

Расчетная температура определяется из теплового расчета опорной обечайки.

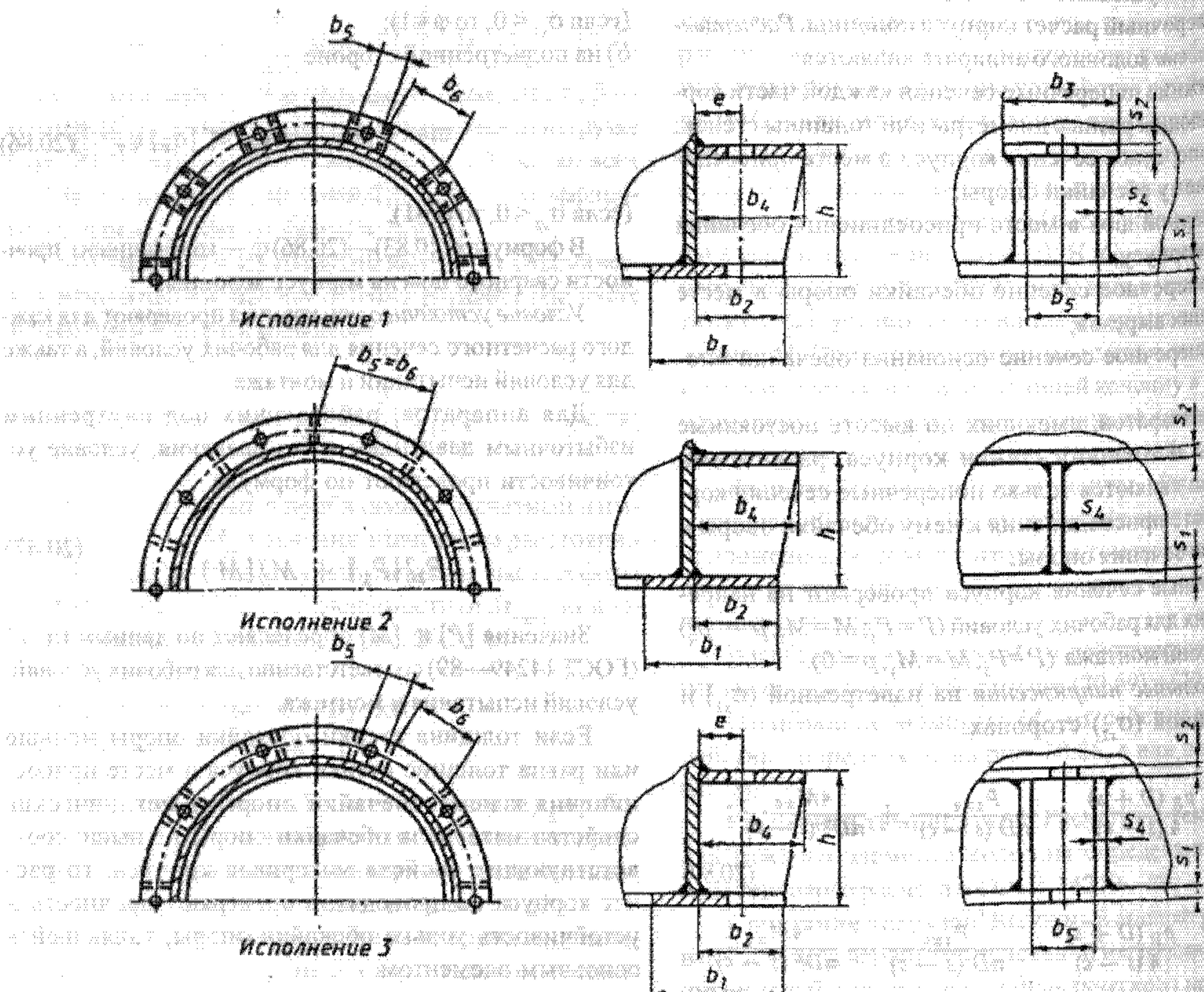


Рис. 20.35. Конструктивные элементы опорного узла:

- исполнение 1 — опорный узел выполнен в форме отдельных столиков под каждый анкерный болт;
- исполнение 2 — опорный узел выполнен в виде двух горизонтальных колец, подкрепленных ребром в промежутке между двумя смежными анкерными болтами;
- исполнение 3 — то же, но подкрепленных двумя ребрами у каждого анкерного болта

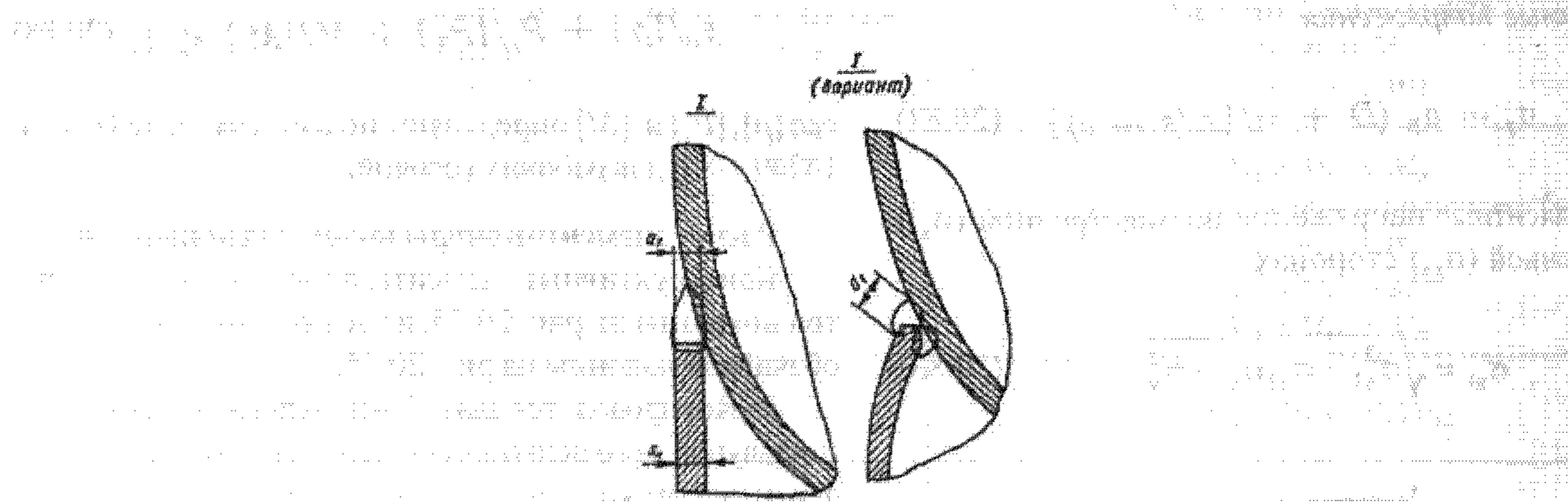


Рис. 20.36. Узел соединения опоры с обечайкой колонны

**Обечайка опоры.** Прочность сварного соединения опоры с корпусом определяется условием

$$\sigma = \frac{1}{\pi D a_1} \left( \frac{4M_y}{D} + P_u \right) < 0.8 \min ([\sigma_o], [\sigma_k]), \quad (20.89)$$

где  $M_y$  — максимальный изгибающий момент в сечении  $y-y$ ;  $P_u$  — осевая сжимающая сила в условиях гидравлического испытания аппарата;  $a_1$  — расчетная толщина сварного шва;  $[\sigma_o]$  — допускаемое напряжение для материала опоры;  $[\sigma_k]$  — допускаемое напряжение для материала корпуса аппарата.

Показанная на выносном узле 1 конструкция соединения опорной обечайки с корпусом недостаточно надежна, так как сварной шов не может быть выполнен двусторонним и качество исполнения не может быть проверено рентгеноскопией из-за малого острого угла между обечайкой и днищем. Для колонных аппаратов с соотношением  $H/D > 20$  рекомендуется конструкция соединения опоры с корпусом с использованием торообразного перехода (вариант узла 1 из рис. 20.36), при котором угол между днищем и обечайкой должен составлять  $60-90^\circ$ . Это решение обеспечивает возможность качественного выполнения двустороннего сварного шва и его рентгеноскопический контроль. Для такой конструкции  $\phi = 1$ .

Прочность и устойчивость обечайки опоры в сечении  $z-z$ , проходящем по центру наибольшего отверстия в опоре, определяется условием

$$\frac{P_{zu}}{\Psi_1 [P]} + \frac{M_z + P_{zu} \Psi_3 D}{\Psi_2 [M]} < 1, \quad (20.90)$$

где  $M_z$  — максимальный изгибающий момент в сечении  $z-z$ ;  $P_{zu}$  — осевая сжимающая сила в том же сечении в условиях гидравлического испытания;  $[P]$ ,  $[M]$  — допускаемые осевая сила и изгибающий момент — см. гл. 13.

Если в сечении  $z-z$  имеется несколько отверстий, то расчет ведут для наибольшего из них. Значения коэффициентов  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$  и  $\Psi_3$  определяют по формулам:

$$\Psi_1 = \frac{F_2}{\pi D (s_1 - c)}, \quad \Psi_2 = \frac{4W}{\pi D^2 (s_1 - c)}, \quad \Psi_3 = J_s / D, \quad (20.91)$$

где  $F_2$  — площадь наиболее ослабленного поперечного сечения обечайки опоры;  $W$  — наименьший момент сопротивления того же сечения;  $J_s$  — эксцентриситет центра тяжести того же сечения.

**Нижнее опорное кольцо.** Ширина кольца  $b_1$  устанавливается конструктивно и должна удовлетворять условию

$$b_1 \geq b_{1R} = \frac{1}{\pi D_B [\sigma_{бет}]} (4M_z / D_B + P_x). \quad (20.92)$$

Выступающая наружу от обечайки опоры ширина кольца  $b_1$  принимается из соотношения

$$2d_B + 30 \text{мм} < b_1 < \frac{1}{2} b_1. \quad (20.93)$$

где  $d_B$  — внутренний диаметр резьбы анкерной шпильки.

Толщину нижнего опорного кольца  $s_1$  следует определять по формуле:

$$s_1 \geq \max \left[ \chi_1 b_2 \sqrt{\frac{4M}{D_B} + P} + c, 1.5s_0 \right], \quad (20.94)$$

где  $\chi_1$  — коэффициент, определенный по формуле:

$$\chi_1 = \begin{cases} 1 + 1.8 \left( \frac{b_1}{b_5} \right)^2 & \frac{b_1}{b_5} \leq 1 \\ 1 + 2.97 \left( \frac{b_1}{b_5} \right)^2 & \frac{b_1}{b_5} > 1 \end{cases}$$

$[\sigma]$  — допускаемое напряжение для материала опорного узла при расчетной температуре, МПа;

$b_5$  — максимальное расстояние между двумя смежными ребрами, мм.

#### Верхнее опорное кольцо

Толщину верхнего опорного кольца  $s_2$  следует определять по формуле:

$$s_2 \geq \max \left[ \chi_2 \sqrt{\frac{F_E [\sigma]_B}{[\sigma]_A} + c}, 1.5s_0 \right], \quad (20.95)$$

где  $F_E$  — площадь поперечного сечения анкерного болта по внутреннему диаметру резьбы, мм<sup>2</sup>.

$\chi_2$  — коэффициент, определяемый по формуле

$$\chi_2 = \frac{3 \frac{b_4}{b_5}}{1 + \left( \frac{b_4}{b_5} \right)^2 + \frac{d}{b_5}}$$

где  $[\sigma]_B$  — допускаемое напряжение для материала анкерных болтов, МПа;

$b_4$  — ширина верхнего опорного элемента, мм;

$b_5$  — минимальное расстояние между двумя смежными ребрами, мм;

$d$  — диаметр окружности, вписанной в шестигранник гайки анкерного болта, мм.

При наличии усиливающей пластины толщиной  $s_3$ , приваренной к верхнему опорному кольцу, расчет следует проводить по формуле:

$$(s_2 + s_3) \geq \chi_3 z_3 \sqrt{\frac{F_E [\sigma]_B}{[\sigma]_A} + c}, \quad (20.96)$$

где  $\chi_3$  — коэффициент, определяемый по формуле:

$$\chi_3 = \frac{b_3 \left( \frac{s_2}{s_3} \right)^2}{b_4}$$

где  $b_7$  — ширина усиливающей пластины, мм.

Толщина ребра

$$s_7 = \max \left\{ \frac{F_B [\sigma_B]}{\chi_3 b_2} + c; 0,4 s_1 \right\}, \quad (20.97)$$

где  $\chi_3 = 2$  для опорных узлов исполнений 1 и 3;  $\chi_3 = 1$  для опорного узла исполнения 2.

Для конструкции ребер с соотношением  $b_7/s_7 > 20$  их необходимо дополнительно проверять на устойчивость.

Напряжение изгиба в обечайке опоры от действия верхнего кольца должно удовлетворять условию

$$\sigma = \frac{6\chi_4 F_B [\sigma_B] e}{(s_1 - c)^2 h_1} \leq 1,5 [\sigma_0], \quad (20.98)$$

где  $\chi_4$  — коэффициент, определяемый по формулам:

$$\chi_4 = -0,0248 \left\{ \ln \left( \frac{N}{1100} \right) + \sqrt{\left[ \ln \left( \frac{N}{1100} \right) \right]^2 + 2,628} \right\} + K;$$

$$N = \frac{D_0}{2(s_0 - c)} \left( \frac{10b_3}{D_0} \right)^{2,05} \quad (20.99)$$

$$K = \begin{cases} 0, & \text{при } N \leq 10^4 \\ -0,002 \ln (10^{-4} N), & \text{при } N > 10^4; \end{cases}$$

$b_3 = \begin{cases} b_4 & \text{для опорного узла исполнения 2} \\ (b_5 + b_6) & \text{для опорного узла исполнения 3.} \end{cases}$

$D_0$  — внутренний диаметр опорной обечайки в расчетном сечении, мм.

**Анкерные шпильки.** Число анкерных шпилек устанавливается конструктивно и может составлять 4, 6, 8, 10, 12 и далее кратно четырем, если  $M_3 \leq 0,44 P_3 D_B$ .

Внутренний диаметр резьбы шпильки рассчитывается из условий монтажа, если  $M_3 > 0,44 P_3 D_B$ :

$$d_B \geq \chi_5 \sqrt{\frac{M_3 - 0,44 P_3 D_B}{z_B [\sigma_B] D_B}}, \quad (20.100)$$

где  $\chi_5$  — коэффициент, определяется по формуле:

$$\chi_5 = \begin{cases} 2,25 + 0,3 \frac{P_3 D_B}{M_3}, & \text{при } \frac{P_3 D_B}{M_3} < 0,5 \\ 2,7 - 2 \frac{P_3 D_B}{M_3} + 3,7 \left( \frac{P_3 D_B}{M_3} \right)^2 - 2,5 \left( \frac{P_3 D_B}{M_3} \right)^3 + 0,65 \left( \frac{P_3 D_B}{M_3} \right)^4, & \text{при } \frac{P_3 D_B}{M_3} \geq 0,5, \end{cases}$$

$P_3$  и  $M_3$  определяются по таблице 20.21.

При конструктивном назначении числа и количества анкерных шпилек следует придерживаться следующих рекомендаций:

$D$ , мм .....	<1400	<1400—2200	Св. 2200
$D_B$ , мм .....	M24	M30	M36
$z_B$ , шт .....	4	6	≥12 (шаг ≤ 1200 мм)

Приведенные значения  $d_B$  и  $z_B$  являются наименьшими для указанных диаметров колонных аппаратов, если даже диаметр шпилек  $d_B$  по формуле (20.100) окажется меньше.

Стандартные опоры колонных аппаратов могут выбираться на основе максимальной приведенной нагрузки  $Q_{max}$ . За максимальную приведенную нагрузку принимают большее из значений:

$$Q = 4M_1 / D + P_1, \quad (20.101)$$

$$Q = 4M_2 / D + P_2, \quad (20.102)$$

где  $M_1, M_2$  — расчетные изгибающие моменты в нижнем сечении обечайки соответственно в режиме эксплуатации и гидравлического испытания;

$P_1, P_2$  — осевые сжимающие силы, действующие в нижнем сечении опорной обечайки соответственно в режимах эксплуатации и гидравлического испытания.

**Проверочный расчет опорных балок под тарелки и решетки.** Приближенно принимают, что балка свободно оперта на две опоры и воспринимает равномерно распределенную нагрузку от веса части собственно тарелки или решетки, а также от насадки и слоя рабочей жидкости, находящейся на тарелке или на решетке.

Общую массу, действующую на балку, определяют по формуле:

$$m_6 = \frac{4lb}{\pi D^3} (m_t + \rho_{ж} h_{ж}), \quad (20.103)$$

где  $m_t$  — масса всей тарелки или решетки, кг;  $h_{ж}$  — высота слоя рабочей жидкости на тарелке или решетке, м;  $l$  — длина балки, м;  $b$  — расстояние между осями смежных балок, м;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Расчетный изгибающий момент балки, Н·м

$$M_6 = 0,125 m_6 g l, \quad (20.104)$$

где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения.

Расчетный момент сопротивления балки, м<sup>3</sup>

$$W_{6,R} = M_6 / [\sigma_6], \quad (20.105)$$

где  $[\sigma_6]$  — допускаемое напряжение материала балки, Па.

Расчетный момент инерции балки при допускаемом относительном прогибе ее, равном 0,0005, м<sup>4</sup>

$$\text{при } \frac{P_3 D_B}{M_3} \geq 0,5, \quad J_{6,R} = 26 m_6 g l^2 / E, \quad (20.106)$$

где  $E$  — модуль продольной упругости материала балки, Па.

По найденным значениям  $W_{6,R}$  и  $J_{6,R}$  выбирают профиль и размеры опорной балки.