ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ им. В. А. КУЧЕРЕНКО
ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ РЕЗЕРВУАРОВ И ГАЗГОЛЬДЕРОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ



Москва — 1969

gost.e-ecolog.ru

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ им. В. А. КУЧЕРЕНКО
ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ РЕЗЕРВУАРОВ И ГАЗГОЛЬДЕРОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ
Москва — 1969

УДК 624.953.04 : 699.841

Рекомендации разработаны в Центральной лаборатории сейсмостойкого строительства (руководитель канд. техн. наук В. С. Павлык) ЦНИИ строительных конструкций им. В. А. Кучеренко д-ром техн. наук проф. И. И. Гольденблатом, д-ром техн. наук проф. Н. А. Николаенко, мл. научн. сотр. А. Т. Штоль, инж. В. Р. Тумасовым.

Рекомендации рассчитаны на инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских институтов.

3—2—4

План I кв. 1969 г., п. 16

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящие Рекомендации составлены в дополнение к СНиП II-А.12-62 «Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования», Стройиздат, М., 1962 и «Инструкции по определению расчетной сейсмической нагрузки на здания и сооружения», М., 1962 и состоят из трех разделов.

В первом разделе даны общие рекомендации по выбору расчетных схем и определению расчетной сейсмической нагрузки для частично заполненных резервуаров и газгольдеров с учетом влияния гидродинамической нагрузки.

Приведен расчет резервуаров с плавающей крышей, даны указания по определению гидродинамического давления при вертикальном сейсмическом толчке.

Во втором разделе даны рекомендации по определению расчетной сейсмической нагрузки на мокрые газгольдеры.

В третьем разделе приведены примеры расчета по определению сейсмической нагрузки для цилиндрических и сферических резервуаров различной емкости, вертикальных газгольдеров постоянного и переменного объемов.

В рекомендациях содержатся данные по определению расчетной сейсмической нагрузки для частично заполненных резервуаров и газгольдеров различной емкости.

Дирекция ЦНИИСК им. Кучеренко

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

1.1. Настоящие Рекомендации распространяются на расчет вертикальных круговых цилиндрических и сферических резервуаров, частично заполненных жидкостью.

1.2. Предполагается, что резервуар абсолютно жесткий; жидкость, заполняющая резервуар, обладает вязкостью; сейсмическое движение основания является случайным процессом времени или импульсивным; рассматривается переходной процесс колебания жидкости в резервуаре и считается, что длительность землетрясения составляет 30 *сек*; рассматриваются горизонтальные движения резервуара; даны указания по расчету на вертикальный сейсмический толчок.

1.3. Полная сейсмическая нагрузка, действующая на резервуар, складывается из нагрузки от веса конструкций и от веса заполняющей жидкости.

1.4. Горизонтальные сейсмические силы, приложенные к резервуару и вызванные весом его конструкций, определяются обычным способом по действующему СНиП II-А.12-62, как для жестких конструкций, фундамент которых настолько развит, что поворот сооружения за счет упругости грунта при определении сейсмических воздействий не учитывается.

1.5. Резервуар рассчитывается на горизонтальные и вертикальные гидродинамические силы. Днище резервуара рассчитывается на передаваемое стенками резервуара контурное давление. Указанные нагрузки суммируются с гидростатическим давлением жидкости на стенки и днище.

1.6. Во избежание гидродинамического удара развивающейся в резервуаре волны о покрытие определяется необходимый зазор A_s между уровнем жидкости и покрытием, если частота волны первой формы больше 1 (1/*сек*).

1.7. Если балки покрытия разделяют свободную поверхность жидкости на отсеки, то величина зазора A_s определяется от низа балок до уровня жидкости.

1.8. Если резервуар в силу технологических особенностей заполнен полностью, то жидкость рассматривается как твердое тело.

1.9. Резервуары с одной центральной колонной, радиус которой меньше 0,07 радиуса резервуара, рассчитываются как резервуары без колонны (влиянием колонны можно пренебречь).

1.10. Для резервуара, в котором колонны расположены по концентрическим окружностям, радиус которых меньше 0,07 наименьшего расстояния между колоннами, влиянием колонн можно пренебречь.

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗЕРВУАР

1.11. Частота волны первой формы вычисляется по формуле

$$\widetilde{\omega}_1 = \sqrt{\frac{1{,}84 \cdot g}{a} \cdot \operatorname{th}\left(1{,}84\,\frac{h}{a}\right)}, \qquad (1.1)$$

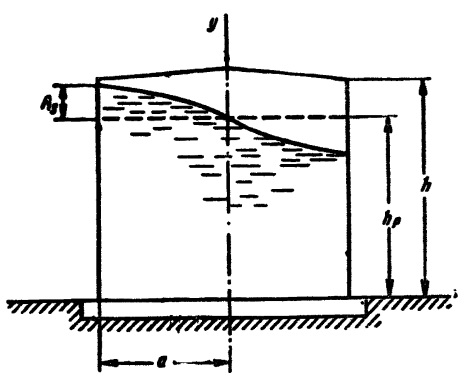


Рис. 1. Схема цилиндрического резервуара

где a — внутренний радиус резервуара;
h — высота резервуара (см. рис. 1);
th — гиперболический тангенс.

Если $\widetilde{\omega}_1 > 1\ \frac{1}{сек}$, то весь дальнейший расчет ведется по формулам п. 1.11—1.16.

Если $\widetilde{\omega}_1 \leqslant 1\ \frac{1}{сек}$, то расчет ведется по формулам п. 1.19—1.21.

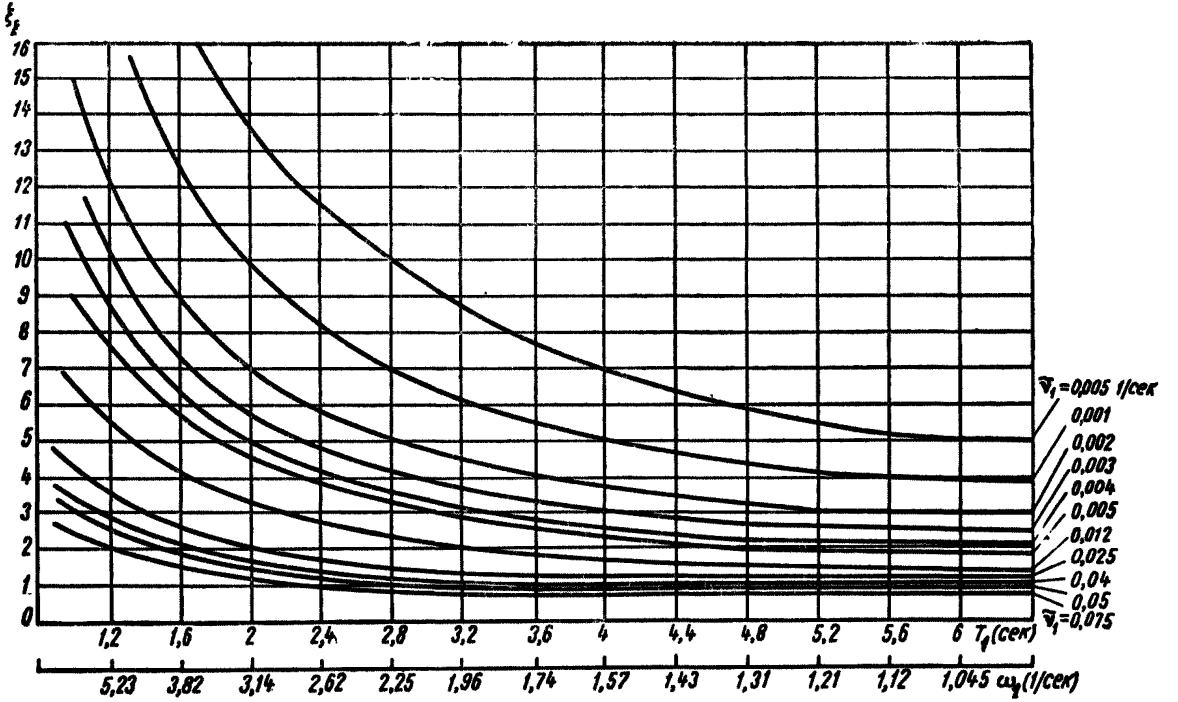


Рис. 2. Графики коэффициента ξ_ξ для расчета высоты волны в цилиндрическом резервуаре

1.12. Величина зазора A_s (рис. 1) между уровнем жидкости и покрытием резервуара определяется по формуле (1.2):

$$A_s = 0{,}836\, a\, k_c\, \xi_{\tilde{\xi}} \sqrt{1 - e^{-60\,\tilde{\nu}_1}}, \qquad (1.2)$$

где k_c — коэффициент сейсмичности, зависящий от балльности района; определяется по СНиП II-А.12-62;

e — основание натурального логарифма;

$\xi_{\tilde{\xi}}$ — коэффициент, который берется по графикам рис. 2 в зависимости от параметра, характеризующего затухание $\tilde{\nu}_1$, который вычисляется по формулам (1.3) и (1.4) и частоты волны первой формы $\tilde{\omega}_1$.

Для любого отношения $\frac{h}{a}$

$$\tilde{\nu}_1 = \xi_{\tilde{\nu}} \frac{\sqrt{\nu}}{a \sqrt[4]{a}}, \qquad (1.3)$$

где $\xi_{\tilde{\nu}}$ — коэффициент, который берется по графику рис. 3,*а* в зависимости от $h_0 = \frac{h}{a}$;

ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости, который берется в *см*^{2}/*сек*, а величина a — берется в *см*,

для $h > a$ ($h_0 > 1$)

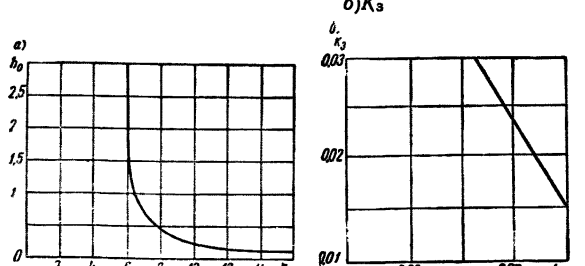


Рис. 3. Графики коэффициентов $\xi_{\tilde{\nu}}$ и α_1 для расчета цилиндрических резервуаров

а — график коэффициента $\xi_{\tilde{\nu}}$; *б* — график коэффициента α_1

Таблица 1

Температура в *град*	Кинематическая вязкость в стоксах (*см²/сек*)														
		Масла										Реактивные топлива			
	Вода	авиамасло МЗС	автол 18	автол 10	трансформаторное	турбинное	автотракторное АС-5	автотракторное АК-6	автотракторное АС-9,5	автотракторное АК-15	автомобильное АК-10	Т-1	Т-5	ТС-1	Т-2
—50	—	$1{,}5\cdot10^5$	$6{,}5\cdot10^6$	$1{,}4\cdot10^6$	—	—	—	—	—	$6{,}5\cdot10^6$	$1{,}4\cdot10^6$	1500	10 000	800	500
—40	—	13 600	$1{,}9\cdot10^5$	36 200	99,847	—	—	—	—	$1{,}8\cdot10^5$	36 200	900	5 000	500	430
—30	—	1 930	20 000	3 400	18,237	230,38	—	—	—	20 000	3 400	—	—	—	—
—20	—	388	2 650	540	4,812	43,57	—	—	—	2 650	540	460	1 800	280	220
—10	—	111	490	122	1,92	12,51	—	—	—	490	122	—	—	—	—
0	0,018	35,5	116	39	0,91	4,6	8,673	19,34	33,69	116	39,1	250	600	180	150
10	0,013	—	—	—	0,49	1,99	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	0,01	5,61	12,8	6	0,28	1,019	1,709	2,847	4,775	12,8	6	160	400	130	110
30	0,008	—	—	—	0,179	0,567	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40	0,0066	—	—	—	0,123	0,344	—	—	—	—	—	120	250	100	90
50	0,0055	0,85	1,21	0,758	0,096	0,219	0,3219	0,4361	0,6791	1,21	0,758	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	90	180	80	75
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75	—	69	—
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	—	0,142	0,153	0,114	—	—	0,0668	0,0778	0,1063	0,153	0,114	64	—	56	—

$$\widetilde{\nu}_1 = 5{,}98\sqrt[4]{\operatorname{th}(1{,}84\,h_0)}\;\frac{\sqrt{\nu}}{a\sqrt[4]{a}}. \qquad (1.4)$$

Некоторые значения коэффициента ν приведены в табл. 1.

Если $1 \leqslant \widetilde{\omega}_1 \leqslant 6$ *1/сек*, то A_s вычисляется по формуле

$$A_s = 0{,}0836\,\frac{\widetilde{\omega}_1}{\sqrt{\widetilde{\nu}_1}}\,ak_c\sqrt{1-e^{-60\,\widetilde{\nu}_1}}. \qquad (1.5)$$

1.13. Гидродинамическое давление жидкости на стенки резервуара вычисляется по формуле

$$P(y) = P_{\max}(y)\sin\theta, \qquad (1.6)$$

где

$$P_{\max}(y) = V_{\text{об}}\,a\,k_c\,\xi_p\sqrt{1-e^{-60\,\widetilde{\nu}_1}}, \qquad (1.7)$$

$V_{\text{об}}$ — объемный вес жидкости, заполняющей резервуар;

ξ_p — коэффициент, который берется по табл. 2 в зависимости от величины $\widetilde{\nu}_1$, $\widetilde{\omega}_1$ и $E_1(y)$;

$$E_1(y) = 0{,}418\left[1-\frac{\operatorname{ch}\left(1{,}84\,h_0\,\frac{y}{h}\right)}{\operatorname{ch}(1{,}84\,h_0)}\right], \qquad (1.8)$$

ch — гиперболический косинус;

y — ордината (см. рис. 4,*а*);

θ — угол (см. рис. 4,*б*).

Распределенная нагрузка по оси резервуара вычисляется по формуле

$$P_{\text{ос}}(y) = 3{,}14\,V_{\text{об}}\,a^2\,k_c\,\xi_p\sqrt{1-e^{-60\,\widetilde{\nu}_1}}. \qquad (1.9)$$

Примечания: 1. Значения коэффициента ξ_p могут вычисляться по линейной интерполяции табл. 2.

2. Резервуар на нагрузку $P(y)$ рассчитывается как консольная балка с защемленным концом, по оси которой действует нагрузка $P_{\text{ос}}(y)$ [формула (1.9) (см. рис. 4,*г*)].

1.14. Результирующая гидродинамического давления жидкости на стенки резервуара (полное горизонтальное усилие) определяется по формуле

Таблица 2

Таблица коэффициентов динамичности

$\frac{E_1}{\widetilde{\omega}_1}$	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0
			$\widetilde{\nu}_1 = 0{,}075$ 1/сек			
10	1,23	2,01	2,91	3,88	4,36	4,83
6	0,92	1,11	1,48	1,92	2,15	2,39
4	0,85	0,84	0,97	1,21	1,35	1,49
3	0,83	0,74	0,76	0,9	0,99	1,1
2,5	0,82	0,7	0,67	0,75	0,82	0,9
2	0,81	0,66	0,59	0,61	0,65	0,72
			$\widetilde{\nu}_1 = 0{,}06$ 1/сек			
10	1,415	2,43	3,57	4,75	5,33	5,92
6	0,985	1,805	1,79	2,34	2,63	2,93
4	0,876	0,94	1,165	1,475	1,65	1,84
3	0,843	0,803	0,893	1,09	1,21	1,33
2,5	0,83	0,74	0,773	0,905	1	1,08
2	0,82	0,695	0,66	0,729	0,8	0,88
1			0,6	0,69	0,75	0,75
			$\widetilde{\nu}_1 = 0{,}041$ 1/сек			
10	1,65	2,67	3,98	5,29	5,75	6,35
6	1,03	1,43	2	2,62	2,95	3,27
4	0,83	1	1,27	1,65	1,84	2,06
3	0,85	0,79	0,99	1,21	1,32	1,5
2,5	0,82	0,73	0,84	0,99	1,11	1,21
2	0,79	0,71	0,74	0,84	0,89	0,98
			$\nu_1 = 0{,}025$ 1/сек			
10	1,81	3,39	5,05	6,31	7,51	8,37
6	1,14	1,78	2,52	3,31	3,73	4,15
4	0,91	1,22	1,59	2,03	2,33	2,58
3	0,86	0,96	1,2	1,67	1,72	1,89
2,5	0,85	0,87	1,05	1,27	1,41	1,56
2	0,84	0,78	0,84	1,01	1,12	1,27

Продолжение табл. 2

$\frac{E_1}{\widehat{\omega_1}}$	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0
			$\nu_1 = 0{,}005$ 1/сек			
10	3,83	7,52	11,3	15	16,9	18,75
6	2,01	3,74	5,66	7,4	8,34	9,27
4	1,405	2,38	3,49	4,63	5,21	5,78
3	1,175	1,795	2,57	3,4	3,83	4,27
2,5	1,06	1,48	2,14	2,81	3,14	3,49
2	0,973	1,26	1,71	2,26	2,51	2,77
1	0,95	1,1	1,25	1,4	1,6	1,8
			$\nu_1 = 0{,}004$ 1/сек			
10	4,26	0,35	12,6	16,8	18,9	21
6	2,22	4,18	6,21	8,28	9,32	10,32
4	1,51	2,65	3,9	5,18	5,81	6,47
3	1,24	1,98	2,87	3,8	4,26	4,74
2,5	1,12	1,67	2,38	3,14	3,52	3,91
2	1,01	1,36	1,9	2,49	2,8	3,1
1	1,1	1,2	1,4	1,7	1,8	2,1
1	1,05	1,21	1,71	2,25	2,72	3
			$\nu_1 = 0{,}003$ 1/сек			
10	4,9	9,73	14,5	19,4	21,8	24,2
6	2,51	4,81	7,16	9,56	10,76	11,93
4	1,69	3,04	4,49	5,95	6,7	7,45
3	1,35	2,26	3,3	4,38	4,93	5,46
2,5	1,205	1,91	2,74	3,61	4,06	4,51
2	1,073	1,56	2,18	2,87	3,23	3,58
1	1	1,2	1,62	1,93	2,21	2,45

Продолжение

$\frac{E_1}{\widetilde{\omega}_1}$	0,4	0,3	0,2	0,1	0,65	0
			$\nu_1 = 0{,}002$ 1/сек			
10	5,96	11,85	17,8	23,7	26,7	29,7
6	3,03	5,87	8,8	11,7	13,18	14,62
4	1,99	3,7	5,49	7,32	8,24	9,14
3	1,56	2,74	4,03	5,35	6,03	6,66
2,5	1,36	2,29	3,34	4,43	4,98	5,52
2	1,18	1,86	2,66	3,52	3,96	4,4
1	1,05	1,21	1,71	2,25	2,72	3
			$\nu_1 = 0{,}001$ 1/сек			
10	8,44	16,81	25,2	33,6	37,81	42
6	4,22	8,29	12,42	16,58	18,65	20,71
4	2,7	5,2	7,78	10,36	11,64	12,95
3	2,06	3,84	5,65	7,59	8,55	9,49
2,5	1,76	3,18	4,71	6,97	7,04	7,83
2	1,47	2,56	3,75	4,25	5,59	6,21
1	1,13	1,62	2,11	2,63	3,12	3,75
			$\nu_1 = 0{,}0005$ 1/сек			
10	11,9	23,81	35,6	47,5	53,3	61
6	5,9	11,84	17,58	23,4	26,3	28,8
4	3,75	7,35	11	14,65	16,5	18,3
3	2,8	5,4	8,05	10,71	12,15	13,15
2,5	2,36	4,47	6,65	8,86	9,95	11,06
2	1,93	3,57	5,29	7,04	7,92	8,82
1	1,73	2,63	3,21	38,1	4,21	4,95
			$\nu_1 = 0{,}0001$ 1/сек			
2	—	—	7,2	9,8	11,4	13,4
1	—	—	4,6	5,5	6	6,6

$$X_г = Q_ж k_c \xi_р \sqrt{1 - e^{-60 \widetilde{\nu}_1}}, \qquad (1.10)$$

где $Q_ж$ — вес всей жидкости; коэффициент $\xi_р$, определяемый по табл. 2 в зависимости от $\widetilde{\omega}_1$, $\widetilde{\nu}_1$ и E_1, которое равно:

$$E_1 = 0{,}418 - 0{,}237 \frac{\operatorname{th}(1{,}84 h_0)}{h_0}. \qquad (1.11)$$

1.15. Координата y_c (рис. 4,*а*), определяющая линию действия силы $X_г$, соответствует центру тяжести эпюры гидродинамического давления.

Для приближенного определения y_c допускается кривую P_{max} (y) заменить двумя трапециями (см. рис. 4,*а*), тогда

$$y_c = \frac{0{,}5 (P_1 + P_2) h_1 \left[\frac{h_1}{3} \frac{(2P_1+P_2)}{(P_1+P_2)} + h_2\right] + 0{,}5 \left[\frac{h_2^2}{3} (2P_2+P_3)\right]}{0{,}5 (P_1 + P_2) h_1 + 0{,}5 (P_2 + P_3) h_2}. \qquad (1.12)$$

1.16. Контурное давление на днище (см. рис. 4,*в*), вызванное моментом сил, действующих на стенки резервуара, вычисляется по формуле

$$q(\theta) = q_{max} \sin\theta, \qquad (1.13)$$

где

$$q_{max} = \frac{X_г y_c}{\pi a^2}. \qquad (1.14)$$

Примечание. Статический расчет днища на контурную нагрузку $q(\theta)$ производят по формулам, приведенным в Инструкции, опубликованной в сборнике «Исследование по сейсмостойкости зданий и сооружений», Госстройиздат, 1961. Для расчета днища можно использовать практические методы, приведенные в книгах Б. Г. Коренева и Е. И. Черниговской «Расчет плит на упругом основании», Госстройиздат, 1962, И. И. Гольденблата и Н. А. Николаенко «Расчет конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил», М., Госстройиздат, 1961.

В книге И. И. Гольденблата и Н. А. Николаенко имеются указания по расчету резервуаров на действие нагрузки $P(y)$.

1.17. Распределенная гидродинамическая нагрузка по оси центральной круглой колонны вычисляется по формуле:

$$P_{oc}(y) = 3{,}14 V_{об} a a_1 k_c \xi_р \sqrt{1 - e^{-60 \widetilde{\nu}_1}}, \qquad (1.15)$$

где a_1 — радиус колонны;

a — радиус резервуара;
$V_{об}$ — объемный вес жидкости;
κ_c — коэффициент сейсмичности;
ξ_p — коэффициент, который берется по табл. 2 в зависимости от $\tilde{\omega}_1$, $\tilde{\nu}_1$ и $E_1(y)$; величины $\tilde{\omega}_1$ и $\tilde{\nu}_1$ вычисляются по формулам (1.1), (1.3), (1.4), а величина $E_1(y)$ — по формуле

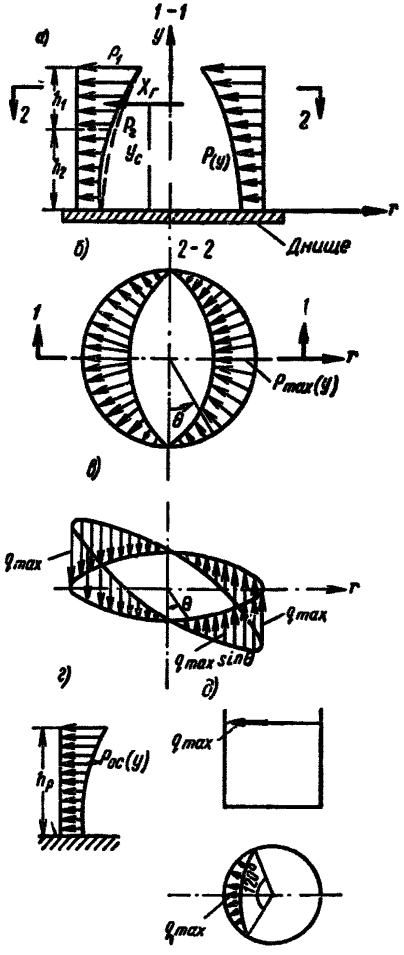


Рис. 4. Эпюры распределения гидродинамического давления жидкости в цилиндрическом резервуаре

$$E_1(y) = \alpha_1 \left[1 - \frac{\operatorname{ch}\left(1{,}84\, h_0 \frac{y}{h}\right)}{\operatorname{ch}(1{,}84\, h_0)} \right], \qquad (1.16)$$

где α_1 — коэффициент, который берется по графику рис. 3,*б* в зависимости от $K_3 = \frac{a_1}{a}$; остальные величины имеют прежнее значение [см. расшифровку к формуле (1.8)].

1.18. Если частота волны первой формы жидкости, заполняющей резервуар, меньше или равна 1 1/*сек* ($\widetilde{\omega}_1 \leqslant \leqslant 1$ 1/*сек*), то расчет высоты волны не производится.

1.19. Для $\widetilde{\omega}_1 \leqslant 1$ 1/*сек* гидродинамическое давление жидкости на стенки резервуара вычисляется по формуле

$$P(y) = P_{\max}(y) \sin\theta, \tag{1.17}$$

где

$$P_{\max}(y) = V_{об}\, a\, k_c\, K_1, \tag{1.18}$$

$$K_1 = 1 - 0{,}836\, \frac{\operatorname{ch}\left(1{,}84\, h_0\, \frac{y}{h}\right)}{\operatorname{ch}(1{,}84\, h_0)}. \tag{1.19}$$

$V_{об}$ — объемный вес жидкости.

На рис. 5,*а* для ряда значений $h_0 = \frac{h}{a}$ в зависимости от y/h приведены графики коэффициента K_1.

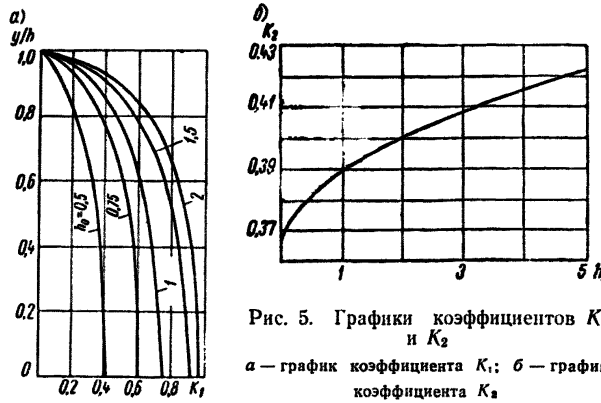


Рис. 5. Графики коэффициентов K_1 и K_2

а — график коэффициента K_1; *б* — график коэффициента K_2

1.20. Для $\widetilde{\omega}_1 \leqslant 1$ 1/*сек* результирующая гидродинамического давления жидкости на стенки резервуара (полное горизонтальное усилие) определяется по формуле

$$X_г = Q_ж\, k_c\, \widetilde{k}_1, \tag{1.20}$$

где $Q_ж$ — вес всей жидкости.

Коэффициент $\widetilde{k}_1$ берется по графику 1 рис. 12,*а* в зависимости от h_0.

Координата y_c, определяющая линию действия силы $X_г$ (см. рис. 4,*а*), вычисляется по формуле

$$y_c = hK_2. \tag{1.21}$$

Коэффициент K_2 берется по графику рис. 5,*б* в зависимости от h_0.

1.21. Для $\widetilde{\omega}_1 \leqslant 1$ 1/*сек* контурное давление на днище (или фундамент), вызванное моментом сил, действующих на стенки резервуара (см. рис. 4,*в*), вычисляется по формуле

$$q(\theta) = q_{max} \sin\theta, \tag{1.22}$$

где

$$q_{max} = V_{об} h^2 k_c \widetilde{k}_1 K_2. \tag{1.23}$$

Цилиндрический резервуар с плавающей крышей

1.22. Расчет высоты волны в цилиндрическом резервуаре с плавающей крышей не производится.

1.23. Гидродинамическое давление жидкости на стенки резервуара по высоте распределено равномерно, в плане по закону синуса и вычисляется по формуле

$$P = P_{max} \sin\theta, \tag{1.24}$$

где

$$P_{max} = \left(1 - \frac{0{,}4}{\operatorname{ch}(1{,}84\, h_0)}\right) a V_{об} k_c, \tag{1.25}$$

$$h_0 = \frac{h}{a}$$

1.24. Результирующая гидродинамического давления жидкости на стенки резервуара определяется по формуле

$$X_г = Q_ж \left(1 - \frac{0{,}4}{\operatorname{ch}(1{,}84\, h_0)}\right) k_c. \tag{1.26}$$

Координата y_c равна

$$y_c = \frac{h}{2}. \tag{1.27}$$

1.25. Контурное давление на днище (см. рис. 4,*в*), вызванное моментом сил, действующих на стенки резервуара, распределено по закону синуса и вычисляется по формуле

$$q(\theta) = q_{max} \sin\theta, \tag{1.28}$$

где

$$q_{max} = \frac{X_г h}{2\pi a^2}. \tag{1.29}$$

1.26. Для резервуаров, предназначенных для сейсмических районов, предпочтительна плавающая крыша с мягким затвором. Сейсмическая нагрузка от плавающей крыши распределена по закону синуса, передается на стенки резервуара в крайнем верхнем положении понтона (см. рис. 4,*д*) и вычисляется по формуле

$$q_1(\theta) = q_{1\,max} \sin\frac{3}{2}\theta;\ 0 \leqslant \theta \leqslant 120°, \tag{1.30}$$

где

$$q_{1\,max} = 2{,}4\frac{P_п k_с}{a}, \tag{1.31}$$

$P_п$ — вес понтона.

1.27. Сейсмическое давление жидкости на стенки резервуара при вертикальном сейсмическом толчке вычисляется по формуле

$$P_{верт} = 3 k_с P_с, \tag{1.32}$$

где $P_с$ — гидростатическое давление жидкости;

$P_{верт}$ — по высоте распределена так же, как гидростатическая нагрузка, и суммируется с последней.

Если резервуар с плавающей крышей, которая при незаполненном резервуаре опирается на стойки, то необходим расчет на вертикальные силы крыши и стоек. Расчет этих конструкций производится по СНиП II-А.12-62.

Сферический резервуар

[установка на жестком железобетонном стакане (рис. 6)]

1.28. Результирующая гидродинамического давления жидкости на стенки резервуара (полное горизонтальное усилие) определяется по формуле

$$X_г = 1{,}05 V_{об} a^3 h_0^2 (3 - h_0) k_с \xi_р \sqrt{1 - e^{-60\overline{\nu}_1}}, \tag{1.33}$$

где

$$h_0 = \frac{h}{a};$$

величины h_0 и a см. на рис. 8;

ξ_p — коэффициент, который определяется по табл. 2 в зависимости от $\widehat{\omega}_1$, $\widetilde{\nu}_1$ и E_1, равных:

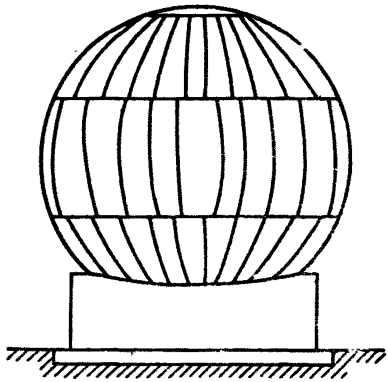


Рис. 6. Установка резервуара на кольцевом железобетонном «стакане»

$$\widehat{\omega}_1 = \sqrt{\frac{g}{a}\,\overline{C}_2}. \tag{1.34}$$

$$\widehat{\nu}_1 = \frac{0{,}92\sqrt{\widehat{\omega}_1 \nu}}{h_0 a} \quad \text{для } h_0 < 1; \tag{1.35}$$

$$\widehat{\nu}_1 = \frac{0{,}92\sqrt{\widehat{\omega}_1 \nu}}{a} \cdot \frac{1 + 0{,}46\,(2 - h_0)}{1{,}46\,(2 - h_0)} \quad \text{для } h_0 > 1; \tag{1.36}$$

$$E_1 = 0{,}5\left[1 - \frac{\overline{C}_1}{1{,}05\,h_0^2\,(3 - h_0)}\right], \tag{1.37}$$

где $\overline{C}_1$ и $\overline{C}_2$ — коэффициенты, которые определяются по графикам рис. 7,*а* и 7,*б* в зависимости от h_0.

1.29. Координата y_c (рис. 8) равна:

$$y_c = \frac{2}{3}\,h. \tag{1.38}$$

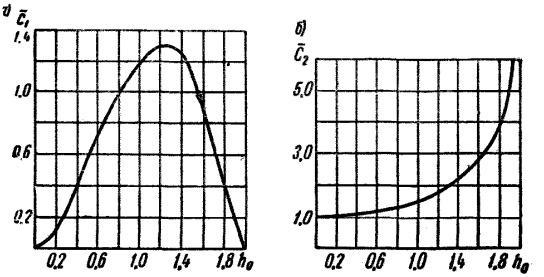


Рис. 7. Графики коэффициентов $\bar{C}$
а — график коэффициента $\bar{C}_1$; *б* — график коэффициента $\bar{C}_2$

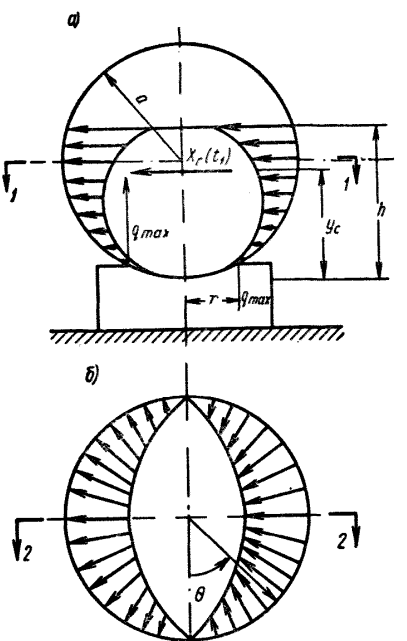


Рис. 8. Эпюра гидродинамического давления жидкости в сферическом резервуаре

1.30. Резервуар рассчитывается на силы реакций от железобетонного стакана (см. рис. 8), которые распределяются по контуру опирания радиуса r, по формуле

$$q(\theta) = q_{max} \sin\theta, \tag{1.39}$$

где

$$q_{max} = \frac{X_r y_c}{\pi r^2}. \tag{1.40}$$

Эпюра нагрузки $q(\theta)$ имеет такой же вид, как и контурное давление на днище в случае цилиндрического резервуара (см. рис. 4,*в*).

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА МОКРЫЕ ГАЗГОЛЬДЕРЫ

2.1. Настоящие Рекомендации распространяются на расчет мокрых сферических и цилиндрических газгольдеров, схемы которых показаны на рис. 9, 10, 11, а также на расчет сферических резервуаров, устанавливаемых на стойках.

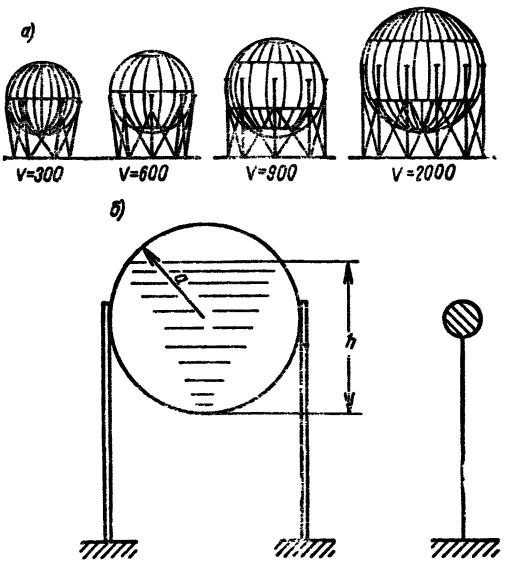


Рис. 9. Схема сферического резервуара, установленного на стойках

а — общий вид; *б* — расчетная схема

2.2. Сейсмическая нагрузка для частично заполненного сферического резервуара [газгольдера, устанавливае-

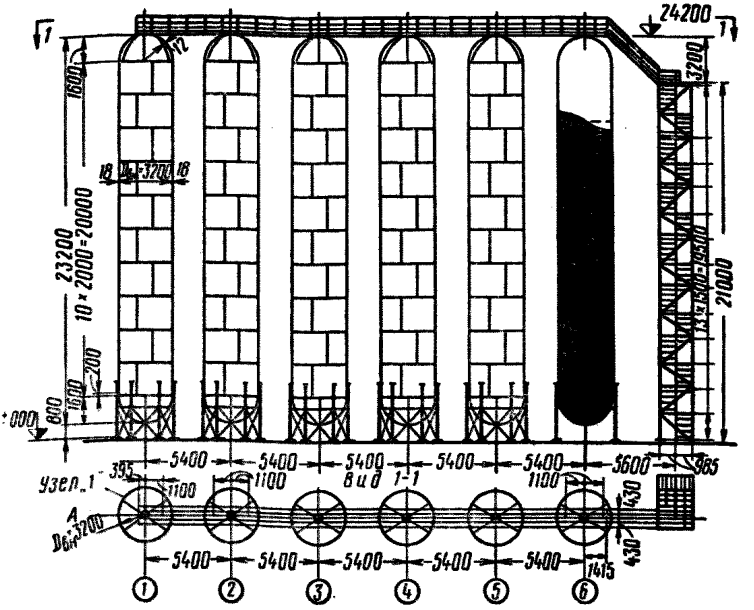


Рис. 10. Схема вертикальных цилиндрических газгольдеров

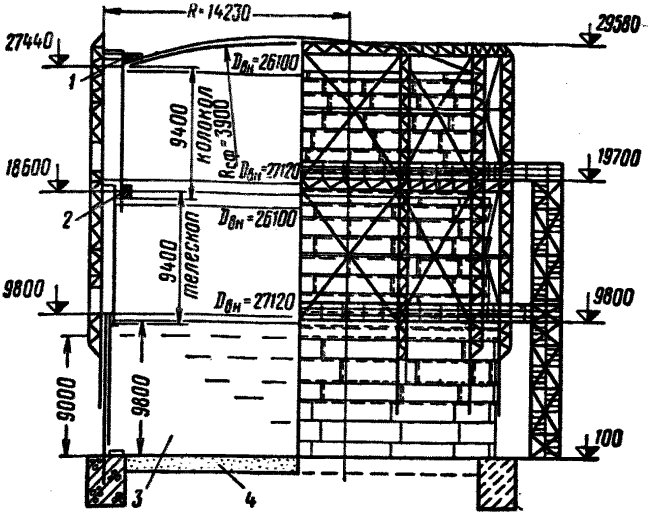


Рис. 11. Схема газгольдера переменного объема

1 — бетонные грузы по всему контуру весом 28 *т* (колокола);
2 — чугунные грузы по всему контуру весом 55 *т* (колокола);
3 — резервуар; *4* — песчано-грунтовое основание

мого на стойках (см. рис. 9,*а*)], определяется по формуле

$$S = (Q_к + Q_ж \bar{k}_1)\beta \tilde{k}_c, \qquad (2.1)$$

где $Q_к$ — вес конструкции резервуара с учетом половины веса поддерживающих стоек;

$Q_ж$ — вес жидкости;

$\bar{k}_1$ — коэффициент, который определяется по графику рис. 12,*б* в зависимости от $h_0 = \frac{h}{a}$;

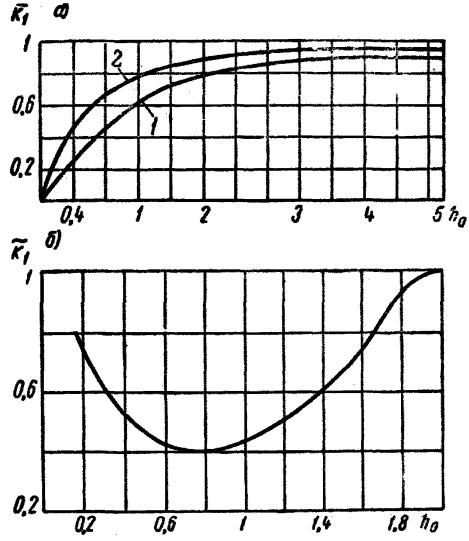


Рис. 12. Графики коэффициента $\tilde{k}_1$ для резервуаров

а — цилиндрического (*1*) и прямоугольного (*2*); *б* — сферического

h и a — см. на рис. 9,*б*;

β и k — коэффициенты динамичности и сейсмичности, которые определяются по СНиП II-А.12-62 в зависимости от периода собственных колебаний T:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{f_{11}(Q_к + Q_ж \tilde{k}_1)}{g}}, \qquad (2.2)$$

где f_{11} — горизонтальное перемещение конструкции, несущей резервуар, от силы, равной 1.

Примечания: 1. Вес жидкости, частично заполняющей сферический резервуар, равен: $Q_ж = 1{,}05\ V_{об}\ a^3\ h_0^2\ (3 - h_0)$;

2. По формуле (2.1) определяется значение сейсмической нагрузки для одноэтажной каркасной конструкции, несущей резервуар. Если резервуар цилиндрический или прямоугольный, то $\tilde{k}_1$ определяется по графику (рис. 12,*а*). Для прямоугольного резервуара $h_0 = h/b$, где b — ширина резервуара, h — высота налива жидкости.

3. Коэффициент формы колебаний (η) для одномассовых систем равен 1.

4. Многоэтажная каркасная конструкция, несущая резервуары, рассчитывается в соответствии с «Инструкцией по определению расчетной сейсмической нагрузки для зданий и сооружений», Госстройиздат, 1962.

5. Конструкции, несущие резервуары, рассчитываются на силу S, вычисленную по формуле (2.1).

2.3. Сейсмические нагрузки и высота волны от жидкости в цилиндрическом и сферическом резервуарах, стоящих на каркасе, определяются следующим образом:

а) для сооружений с периодом собственных колебаний до 0,4 *сек* по формулам (1.10)—(1.29) (рассчитывается как резервуар, стоящий на земле, упругостью каркаса можно пренебречь);

б) для сооружений с периодом собственных колебаний от 0,4 до 1,6 *сек* все расчетные величины, вычисленные по формулам (1.10)—(1.36), берутся с коэффициентом 1,25.

Примечания: 1. При определении периодов собственных колебаний жидкость можно рассматривать как твердое тело с массой, равной $m_ж \tilde{k}_1$, где $m_ж$ — масса жидкости, коэффициент $\tilde{k}_1$ берется в зависимости от резервуара по графикам рис. 12,*а*.

2. В некоторых случаях резервуар, стоящий на каркасе, можно на гидродинамические сейсмические силы не рассчитывать, так как напряжения в конструкциях резервуара от этих нагрузок не превышают 10% статических. Подвижность жидкости существенно влияет на сейсмические нагрузки, которые передаются на несущий каркас.

2.4. При расчете круговых вертикальных цилиндрических газгольдеров (см. рис. 10) с отношением $\frac{h}{a} \geqslant 4$ (h— высота налива жидкости от низа днища; a — радиус) жидкость рассматривается как твердое тело и определение сейсмических сил производится обычным образом в соответствии со СНиП II-А.12-62 и Инструкцией, указанной в п. 2.2, или «Указаниями по определению сейсмиче-

ской нагрузки для вертикальных аппаратов», Госстройиздат, 1961.

2.5. При расчете цилиндрического газгольдера переменного объема (см. рис. 11) сейсмические нагрузки определяются следующим образом:

а) сейсмические нагрузки от заполняющей жидкости определяются по пп. 1.10—1.20;

б) сейсмические нагрузки от веса телескопа, колокола и решетчатой направляющей конструкции определяются как для жесткой системы по СНиП II-А.12-62, при-

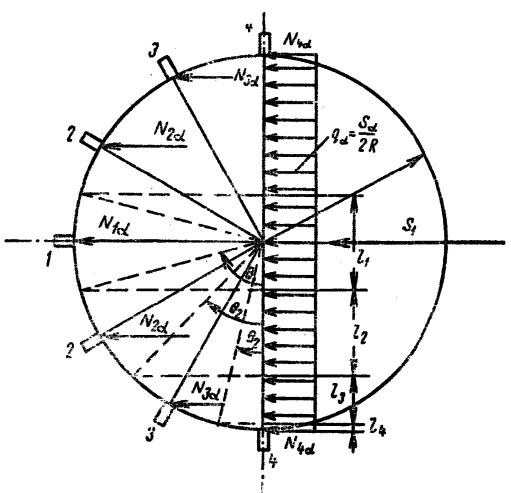


Рис. 13. Распределение сейсмической нагрузки в цилиндрическом газгольдере от веса телескопа и колокола

чем рассматривается крайнее верхнее положение колокола;

в) сейсмическая нагрузка от веса телескопа, колокола и других конструкций газгольдера распределяется на 7 стоек направляющей решетчатой конструкции и считается действующей горизонтально в точках, где находятся подвижные ролики (рис. 13 и 14):

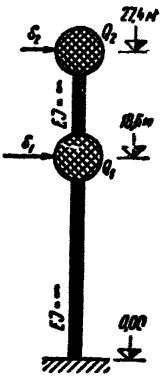


Рис. 14. Расчетная схема газгольдера переменного объема

$$
\left.
\begin{aligned}
N_{1\alpha} &= q_\alpha l_1 = q_\alpha 2R\cos\theta_1 = S_\alpha \cos\frac{5\pi}{12} = 0{,}258\,S_\alpha;\\
N_{2\alpha} &= q_\alpha l_2 = q_\alpha (R\cos\theta_2 - R\cos\theta_1) =\\
&= \frac{S_\alpha}{2}\left(\cos\frac{\pi}{4} - \cos\frac{5\pi}{12}\right) = 0{,}224\,S_\alpha;\\
N_{3\alpha} &= q_\alpha l_3 = q_\alpha (R\cos\theta_3 - R\cos\theta_2) =\\
&= \frac{S_\alpha}{2}\left(\cos\frac{\pi}{12} - \cos\frac{3\pi}{12}\right) = 0{,}130\,S_\alpha;\\
N_{4\alpha} &= q_\alpha l_4 = q_\alpha (R - R\cos\theta_3) =\\
&= \frac{S_\alpha}{2}\left(1 - \cos\frac{\pi}{12}\right) = 0{,}017\,S_\alpha;
\end{aligned}
\right\} \quad (2.3)
$$

где S_α — значение сейсмической силы в точке $\alpha = 1,2$.

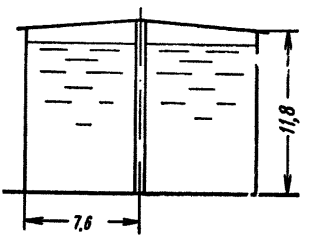
Примечание. При расчете газгольдера переменного объема (см. рис. 11) рекомендуется принять расчетную схему с двумя степенями свободы, сосредоточив массу на уровне верхнего ролика колокола и верхнего ролика телескопа (см. рис. 14).

3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1

Круглый цилиндрический резервуар емкостью 2000 $м^3$

Резервуар предназначен для хранения мазута. Примем, что положительная максимальная температура хранения 20°С. Основные геометрические параметры резервуара указаны на рис. 15.



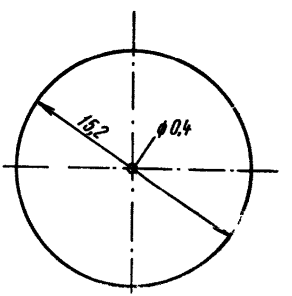


Рис. 15. Схема резервуара емкостью 2000 $м^3$

Радиус резервуара $a=7{,}6$ *м*, высота до кровли $h=11{,}8$ *м*, центральная колонна диаметром 0,4 *м* ($a_1=0{,}2$ *м*); объемный вес мазута $V_{об}=0{,}8$ *т*/$м^3$, коэффициент кинематической вязкости мазута $\nu=1$ $см^2/сек$. Счи-

таем, что сейсмическая активность района строительства 9 баллов ($k_c = 0{,}1$).

Вычисляем величины h_0, $\widetilde{\omega}_1$ и $\widetilde{\nu}_1$:

$$h_0 = \frac{h}{a} = \frac{11}{7{,}6} = 1{,}55;$$

по формуле (1.1)

$$\widetilde{\omega}_1 = \sqrt{\frac{1{,}84 \cdot 9{,}8}{7{,}6} \operatorname{th}(1{,}84 \cdot 1{,}55)} = 1{,}54 \ 1/сек;$$

по формуле (1.4)

$$\widetilde{\nu}_1 = 5{,}98 \sqrt[4]{\operatorname{th}(1{,}84 \cdot 1{,}55)} \ \frac{\sqrt{1}}{760 \sqrt[4]{760}} = 0{,}0015 \ 1/сек.$$

Так как отношение радиуса колонны к радиусу резервуара равно 0,0263, то влиянием колонны на величину амплитуды волны и гидродинамического давления на стенки резервуара можно пренебречь.

Вычислим величину $\sqrt{1 - e^{-60\nu_1}}$ которая понадобится для дальнейших расчетов: $\sqrt{1 - e^{-60 \cdot 0{,}0015}} = 0{,}293$.

По формуле (1.5) вычисляем A_s:

$$A_s = 0{,}0836 \frac{1{,}54}{\sqrt{0{,}0015}} 7{,}6 \cdot 0{,}1 \sqrt{1 - e^{-60 \cdot 0{,}0015}} = 0{,}8 \ м.$$

Таким образом, расчетное значение h_0 равно:

$$h_0 = \frac{11{,}8 - 0{,}8}{7{,}6} \approx 1{,}5.$$

Определяем гидродинамическое давление жидкости на стенки резервуара. Для этого воспользуемся формулами (1.6), (1.8) ($\sin\theta = 1$). Результаты всех вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3

y/h	$E_1(y)$ по формуле (1.8)	ξ_p по таблице 2	$P(y)$, $т/м^2$ по формуле (1.6)	$P_{ос}(y)$, $т/м$ по формуле (1.9)
0	0,384	0,886	0,184	4,4
0,2	0,376	0,905	0,187	4,47
0,4	0,35	1,03	0,214	5,11
0,6	0,301	1,29	0,268	6,4
0,8	0,201	1,94	0,403	9,65
1	0	3,74	0,669	16

На рис. 16,*а* построены эпюры гидродинамических давлений.

Вычислим результирующую гидродинамических сил. По формуле (1.11):

$$E_1 = 0{,}418 - 0{,}237\,\frac{\text{th}\,(1{,}84\cdot 1{,}5)}{1{,}4} = 0{,}36.$$

По табл. 2 определяем ξ_p для $E_1 = 0{,}36$, $\xi_p = 1{,}61$

$$X_r = 1520\cdot 0{,}1\cdot 1{,}61\cdot 0{,}293 = 72 \text{ т}.$$

Вычислим величину y_c по формуле (1.12):

$$y_c = \frac{(0{,}669 - 0{,}268)\,0{,}4\cdot 0{,}87 + 0{,}268\cdot 0{,}4\cdot 0{,}8 + 0{,}184\cdot 0{,}6\cdot 0{,}3 +}{(0{,}669 - 0{,}268)\,0{,}4 + 0{,}268\cdot 0{,}4 + 0{,}184\cdot 0{,}6 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ (0{,}268 - 0{,}184)\,0{,}6\cdot 0{,}4}{+ (0{,}268 - 0{,}184)\,0{,}6}\,h = \frac{0{,}279}{0{,}428}\,h = 0{,}65\,h.$$

По формуле (1.14) определяем максимальное значение контурного давления на днище резервуара:

$$q_{\max} = \frac{72\cdot 0{,}65\cdot 11{,}4}{3{,}14\cdot 7{,}6^2} = 2{,}94 \text{ т/м}.$$

Контурное давление на днище распределяется по закону синуса (1.13); эпюра давления $q(\theta)$ показана на рис. 4,*в*.

По формуле (1.15) вычисляем распределенную гидродинамическую нагрузку на колонну. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

y/h	$E_1(y)$ по формуле (1.16)	ξ_p по табл. 2	$P_{oc}(y)$, т/м по формуле (1.15)
0	0,0588	1,13	0,432
0,2	0,0574	1,15	0,44
0,4	0,053	1,18	0,451
0,6	0,0444	1,21	0,462
0,8	0,0276	1,24	0,474
1	0	1,27	0,486

Величина K_3 равна:

$$K_3 = \frac{0,2}{7,6} = 0,0263.$$

По графику рис. 3,*б* определяем $\alpha_1 = 0,068$.

На рис. 16,*б* приведена эпюра $P_{oc}(y)$.

Сейсмическая нагрузка от веса конструкций резервуара определяется по действующим Нормам и Инструкции, указанной в п. 2.2. Жесткость резервуара в горизонтальном направлении весьма велика (период колебаний

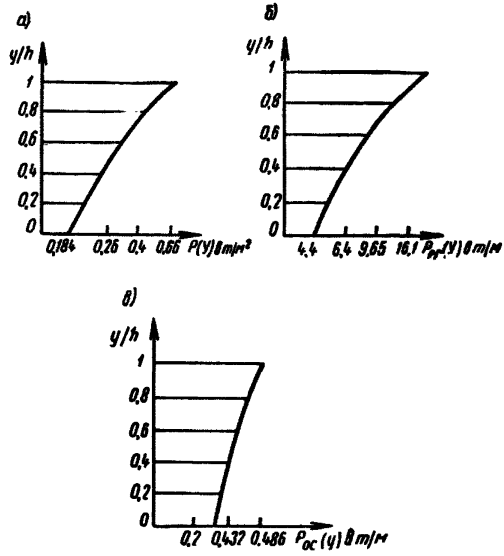


Рис. 16. Эпюры распределения гидродинамического давления жидкости в цилиндрическом резервуаре

а — эпюра гидродинамического давления жидкости на стенки резервуара; *б* — распределение нагрузки по оси резервуара; *в* — распределение нагрузки по оси центральной круглой колонны

его будет мало отличаться от нуля), что дает основание при определении сейсмических сил от веса кровли и корпуса рассматривать резервуар как абсолютно жесткое тело. Тогда в соответствии с принятой методикой

расчета сейсмическая нагрузка для резервуара будет равна:

$$S = Q k_c \beta,$$

где β — коэффициент динамичности;

Q — собственный вес конструкции с коэффициентом перегрузки.

Для жестких конструкций $\beta = 3$, следовательно, от веса кровли $Q_{кр}$ резервуара

$$S_{кр} = 3 \cdot 0{,}1\, Q_{кр} = 0{,}3\, Q_{кр}\ т.$$

Сейсмическая сила от веса корпуса резервуара равномерно распределена по высоте и равна:

$$S_{с.в} = 3 \cdot 0{,}1\, q_{с.в} = 0{,}3\, q_{с.в}\ т/м,$$

где $q_{с.в}$ — вес 1 $м$ корпуса резервуара.

Пример 2

Круглый цилиндрический резервуар емкостью 50 000 $м^3$ с плавающим понтоном

Резервуар предназначен для хранения воды. Основные геометрические параметры резервуара указаны на рис. 17,*а*. Считаем, что сейсмическая активность района строительства 9 баллов ($k_c = 0{,}1$).

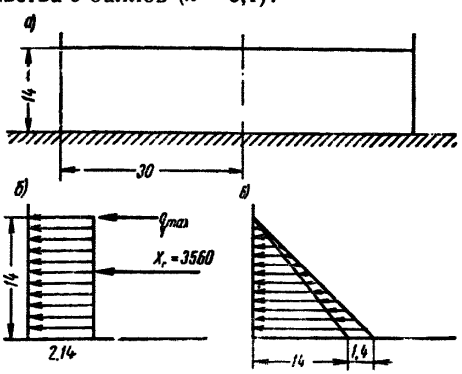


Рис. 17. Цилиндрический резервуар с плавающим понтоном емкостью 50 000 $м^3$

а — схема резервуара; *б* — распределения давления жидкости на стенки резервуара; *в* — сейсмическое давление жидкости на стенки при вертикальном толчке

По формуле (1.1) вычисляем $\tilde{\omega}_1$:

$$\tilde{\omega}_1 = \sqrt{\frac{1{,}84 \cdot 9{,}81}{30} \operatorname{th}\left(1{,}84\,\frac{14}{30}\right)} = 0{,}645 \text{ 1/сек.}$$

Так как $\tilde{\omega}_1 < 1$ 1/сек, то расчет ведем по формулам пп. 1.20—1.25.

Вычисляем P_{max} [см. формулу (1.25)]

$$P_{max} = \left(1 - \frac{0{,}4}{\operatorname{ch} 0{,}856}\right) 30 \cdot 1 \cdot 0{,}1 = 2{,}14 \text{ т/м}^2.$$

Эпюра давления показана на рис. 17,*б*.

По формуле (1.26) вычисляем результирующую давления

$$X_r = 50\,000 \left(1 - \frac{0{,}4}{\operatorname{ch} 0{,}856}\right) 0{,}1 = 3560 \text{ т}.$$

Контурное давление на фундамент вычисляется по формулам (1.28) и (1.29):

$$q_{max} = \frac{3560 \cdot 7}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 30^2} = 4{,}4 \text{ т/м}.$$

В плане нагрузка распределена по закону синуса (см. рис. 4,*в*).

Сейсмическая нагрузка от понтона вычисляется по формуле (1.31), (1.30). Вес понтона 180 *т*,

$$q_{1\,max} = \frac{2{,}4 \cdot 180 \cdot 0{,}1}{30} = 1{,}44 \text{ т/м}.$$

В плане нагрузка распределена по закону синуса (см. рис. 4,*д*), нагрузка $q_1(0)$ приложена на отметке +1400 (см. рис. 17,*б*).

Сейсмическое давление жидкости на стенки резервуара при вертикальном толчке вычисляем по формуле (1.32):

$$P_{верт} = 0{,}1 \cdot 14 \cdot 3 = 4{,}2 \text{ т/м}^2;$$

$$P_c = 14 \cdot 1 = 14 \text{ т/м}^2.$$

Если принять, что для вертикального толчка балльность равна 11, то $k_c = 0{,}4$, тогда

$$P_{верт} = 0{,}4 \cdot 14 \cdot 3 = 16{,}8 \text{ т/м}^2.$$

Полное давление

$$P_{полное} = P_c + P_{верт} = 14 + 16{,}8 = 30{,}8 \text{ т/м}^2.$$

Пример 3

Сферический резервуар

Схема сферического резервуара, установленного на железобетонном «стакане» с указанием размеров, показана на рис. 18. Резервуар предназначен для хранения сжиженного газа; район строительства с сейсмической активностью 9 баллов ($k_c = 0{,}1$). Коэффициент кинематической вязкости сжиженного газа примем равным: $\nu = 0{,}5$ *см*^{2}/*сек*; объемный вес $V_{05} = 0{,}8$ *т*/*м*^{3}.

По формулам (1.34) и (1.36) вычисляем $\tilde{\omega}_1$ и $\tilde{\nu}_1$ для

$$h_0 = \frac{h}{a} = \frac{8}{5} = 1{,}6:$$

$$\tilde{\omega}_1 = \sqrt{c_2 \frac{g}{a}} = \sqrt{2{,}688 \frac{9{,}8}{5}} = 2{,}29 \text{ 1/сек};$$

$$\tilde{\nu}_1 = \frac{0{,}92 \sqrt{2{,}29 \cdot 0{,}5}}{500} \cdot \frac{1 + 0{,}46\,(2 - 1{,}6)}{1{,}46\,(2 - 1{,}6)} = 0{,}004 \text{ 1/сек}.$$

Вычисляем E_1 [формула (1.37)]:

$$E_1 = 0{,}5 \left(1 - \frac{0{,}834}{2{,}09 \cdot 1{,}6}\right) = 0{,}375.$$

Из табл. 2 определяем $\xi_p = 1{,}5$.

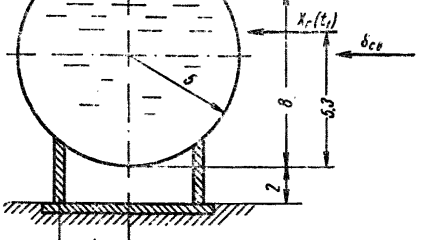


Рис. 18. Схема сферического резервуара, установленного на железобетонном «стакане»

По формуле (1.33) вычисляем $X_г$:

$$X_г = 3{,}77 \cdot 0{,}8 \cdot 5^3 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}5 \sqrt{1 - e^{-0{,}004 \cdot 60}} = 26{,}1 \text{ т}.$$

Величину y_c примем равной $2/3\ h$:

$$y_c = \frac{2}{3} 8 = 5{,}3 \text{ м}.$$

Сейсмическая сила $S_{с.в}$ от собственного веса резервуара определяется так же, как и в случае цилиндрического резервуара. Примем $\beta = 3$, тогда

$$S_{с.в} = Q \cdot 0{,}1 \cdot 3 = 0{,}3\,Q,$$

где Q — вес резервуара.

Контурное давление на днище, на котором устанавливается «стакан», определяется так же, как и для цилиндрического резервуара по формулам (1.13) и (1.14). В формуле (1.14) величина a равна радиусу днища, для данного примера $a = 4$ м.

Используя формулу (1.14), получим

$$q_{max} = \frac{X_г y_c}{\pi a^2} = \frac{26{,}1 \cdot 5{,}3}{3{,}14 \cdot 4^2} = 3{,}1 \quad \text{т/м}.$$

На эту же нагрузку рассчитывается корпус резервуара.

Пример 4

Расчет конструкций, поддерживающих сферические резервуары

На рис. 19 указаны все основные размеры, необходимые для расчета[1]. Предполагаем, что резервуар заполнен сжиженным газом на высоту 9 м. Объемный вес сжиженного газа 1 т/м³. Коэффициент кинематической вязкости $\nu = 0{,}1$; район строительства с сейсмической активностью 8 баллов ($k_c = 0{,}05$). Основными несущими элементами этой конструкции, которые должны рассчиты-

[1] Конструкция резервуара разработана институтом Проектстальконструкция.

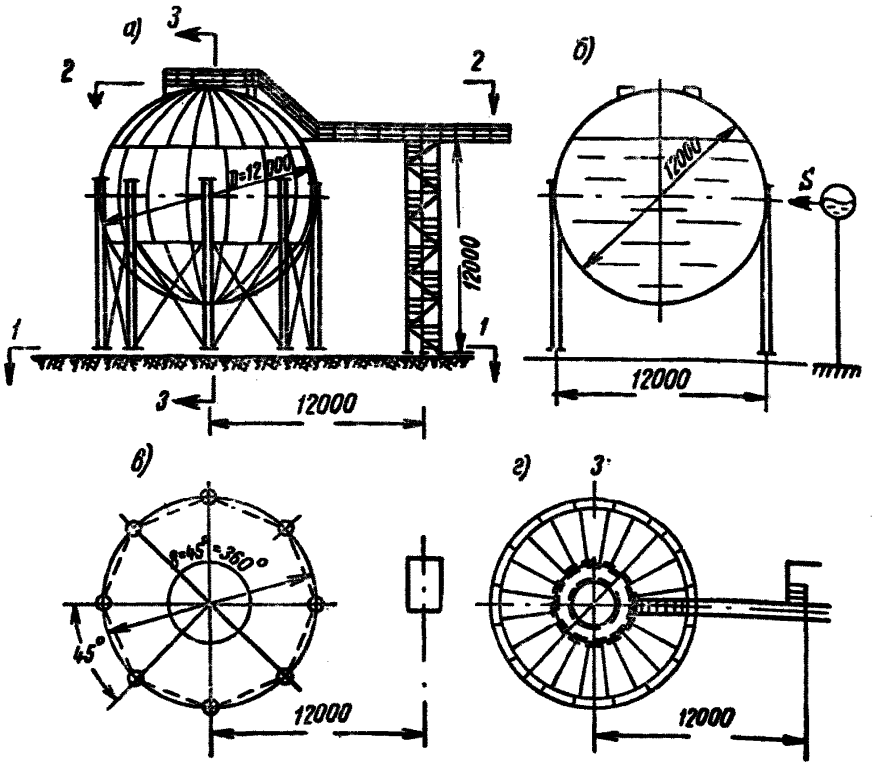


Рис. 19. Конструкция и расчетная схема сферического резервуара, установленного на колоннах

а — общий вид резервуара; *б* — расчетная схема; *в* — разрез по *1—1*; *г* — разрез по *2—2*; *1* — плита δ_{40}; *2* — низ плоскостей связей; *3* — рифленая сталь δ_6

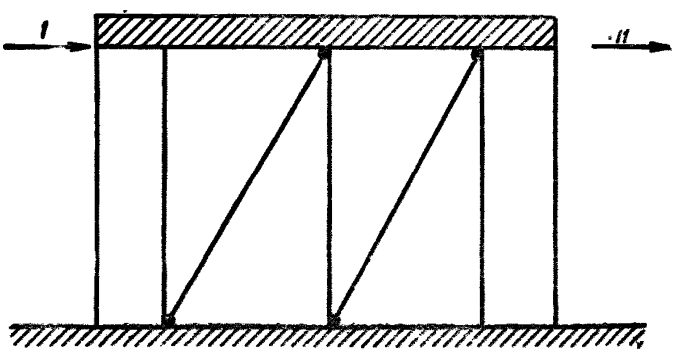


Рис. 20. Схема к определению жесткости конструкции

ваться на сейсмические силы, являются поддерживающие резервуар стойки. Для определения периода собственных колебаний системы принимаем расчетную схему, показанную на рис. 21, и считаем, что стойки на отметке 9 *м* заделаны в плиту с бесконечной жесткостью, а внизу заделаны в фундамент. Тяжи между стойками выполнены из круглой стали диаметром 30 *мм* и могут работать только на растяжение. При горизонтальной нагрузке в работу включаются только 4 тяжа, симметричные относительно диаметра резервуара, вдоль которого действует единичная сила. Предполагается, что стойки испытывают деформации изгиба.

Горизонтальное перемещение f_{11} от единичной силы 1 *т* (см. рис. 20) равно: $f_{11}=0{,}07$ *см*. Вес резервуара равен 128 *т*, вес половины стоек и ограждений равен 25 *т*. Итого полный вес конструктивных элементов

$$Q_к = 128 + 25 = 153 \text{ т}.$$

Вес жидкости

$$Q_ж = 1{,}05 \cdot 6^3 \cdot 1 \frac{9^2}{6^2}\left(3 - \frac{9}{6}\right) = 760 \text{ т}.$$

По графику рис. 12,*б* определяем $\bar{k}_1=0{,}67$. Период собственных колебаний определяем по формуле (2.2):

$$T = 6{,}28 \sqrt{\frac{0{,}07\,(153 + 760 \cdot 0{,}67)}{980}} = 1{,}33 \text{ сек}.$$

Вычислим величину сейсмической силы S, опираясь на значения коэффициента динамичности, приведенного в СНиП II-А.12-62; β для $T=1{,}33$ *сек* равна:

$$\beta = 0{,}6 \cdot 1{,}5 = 0{,}9.$$

Следовательно:

$$S = (153 + 760 \cdot 0{,}67)\, 0{,}05 \cdot 0{,}9 \approx 30 \text{ т}.$$

Для сравнения вычислим величину S_1, рассматривая жидкость как твердое тело:

$$S_1 = (153 + 760) \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}9 = 41 \text{ т}.$$

Пример 5

Вертикальный газгольдер постоянного объема

На рис. 10 показана конструкция группы вертикальных газгольдеров с указанием всех необходимых для

расчета размеров. Район строительства с сейсмичностью 8 баллов ($k_c = 0{,}05$). Рассматриваем одиночный газгольдер; жесткостью связывающей конструкции, идущей по верху газгольдеров, пренебрегаем.

На рис. 21 показана расчетная схема с расположением масс (система с 8 степенями свободы). Группа газгольдеров установлена на одном сплошном фундаменте. При данных размерах газгольдера можно предполагать, что превалируют деформации изгиба.

Рассмотрим два варианта расчета газгольдера.

Первый вариант: газгольдер заполнен полностью водой ($V_{05} = 1$ *т/м*).

Нагрузки:

вес жидкости, заполняющей газгольдер на 1 *м* высоты:

$$q_{ж} = \frac{\frac{3{,}14 \cdot 3{,}2^2}{4}\ 20 + \frac{4}{3}\ 3{,}14 \cdot 1{,}6^3}{21{,}4} = 8{,}32\ т/м$$

(первый член соответствует цилиндрической, а второй — сферической части газгольдера), вес 1 *м* оболочки газгольдера

$$q_{к} = \frac{3{,}14}{4}\ (3{,}236^2 - 3{,}20^2)\ 1{,}0 \cdot 7{,}85 = 1{,}43\ т/м$$

Итого $8{,}32 + 1{,}43 = 9{,}75$ *т/м*.

Вес 1 *м* опоры: трубы 0,262 *т/м*; связи 0,18 *т/м*. Итого 0,44 *т/м*.

Характеристики жесткости:

момент инерции газгольдера $I_1 = 21{,}6 \cdot 10^6$ *см*^{4};

момент инерции опоры (трубы) $I_0 = 0{,}151 \cdot 10^4$ *см*^{4};

площадь опоры трубы $F = 55{,}7$ *см*^{2};

момент инерции системы опор $I_y = 4{,}44 \cdot 10^6$ *см*^{4};

жесткость системы опор $EI_y = 9{,}33 \cdot 10^2$ *кГ·см*^{2}.

В табл. 5 приведен расчет первых трех периодов и форм колебаний. Периоды вычислялись по формуле (8) «Указаний по определению сейсмической нагрузки для вертикальных аппаратов и примеры расчета». Госстройиздат, 1961:

$$T_j = 2\pi \sqrt{\frac{f_s}{X_{js}\, g}},$$

где j — номер формы колебаний;

f_s — статическое перемещение в *см* s-й точки, в которой принята сосредоточенная нагрузка,

под действием горизонтальных сил, равных $P_s=Q_sX_{js}$;

X_{js} — ордината свободных колебаний, определяемая по табл. 3 приложения II упомянутых Указаний в точке, где вычислено перемещение f_s.

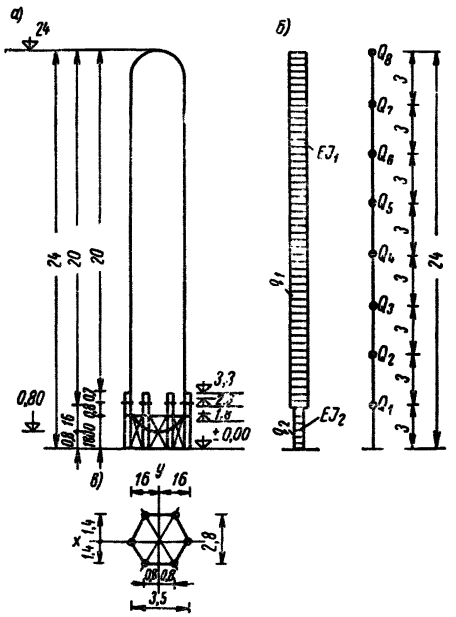


Рис. 21. Расчетная схема полностью заполненного газгольдера

В табл. 5 приведены периоды, вычисленные по значению перемещения первой точки.

В табл. 6 приведены значения коэффициентов форм колебаний η_{js}, β_j и сейсмических сил S_{js}. В графах 9, 14, 19 табл. 5 даны значения сейсмических сил.

Второй вариант: газгольдер заполнен водой до отметки +16,5 *м*.

Таблица 5

№ точек S	Вес Q_s в т	Расстояние от основания h_s в м	Отношение высоты h_s/H	Первая форма колебаний: условные ординаты X^T_{1s}	условная горизонтальная нагрузка $P_s = Q_s X^T_{1s}$	коэффициент формы колебаний η_{s1}	период колебаний T_1 и значение коэффициента β_1	сейсмическая сила $S_s = Q_s \kappa_c \beta_1 \eta_{1s}$	Вторая форма колебаний: условные ординаты X^T_{2s}	условная горизонтальная нагрузка $P_s = Q_s X^T_{2s}$	коэффициент формы колебаний η_{1s}	период колебаний T_2 и значение коэффициента β_2	сейсмическая сила $S_s = Q_s \kappa_c \beta_2 \eta_{2s}$	Третья форма колебаний: условные ординаты X^T_{3s}	условная горизонтальная нагрузка $P_s = Q_s X^T_{3s}$	коэффициент формы колебаний η_{3s}	период колебаний T_3 и значение коэффициента β_3	сейсмическая сила $S_s = Q_s \kappa_c \beta_3 \eta_{3s}$
8	14,7	24	1	1	14,7	1,54		3,3	—1	—14,7	—0,69		—4,85	1	14,7	0,515		3,64
7	29,4	21	0,88	0,835	24,15	1,28		6,4	—0,424	—12,45	—0,29		—4,1	0,103	3,03	0,053		0,75
6	29,4	18	0,75	0,657	22,05	1,01		4,3	0,162	4,77	0,11		1,55	—0,527	—15,5	—0,271		—3,84
5	29,4	15	0,63	0,5	14,7	0,77		3,3	0,508	14,92	0,35		4,95	—0,529	—15,53	—0,272		—3,85
4	29,4	12	0,5	0,34	10	0,52		2,22	0,715	21	0,5		7,05	0,02	0,59	0,0103		0,146
3	29,4	9	0,38	0,211	6,21	0,32		1,37	0,653	19,2	0,45		6,35	0,612	18	0,315		4,45
2	29,4	6	0,25	0,1	2,94	0,15		0,64	0,414	12,17	0,29		4,1	0,781	23	0,403		5,7
1	16,6	3	0,125	0,029	0,48	0,045	$T_1 = 1{,}04$ *сек* $\beta_1 = 1{,}48$	0,11	0,145	2,41	0,1	$T_2 = 0{,}14$ *сек* $\beta_2 = 4{,}8$	0,8	0,319	5,3	0,164	$T_3 = 0{,}124$ *сек* $\beta_3 = 4{,}8$	1,31

Таблица 6

№ точек S	Вес Q_s в т	Расстояние от основания h_s в м	Отношение высот h_s/H	Первая форма колебаний					Вторая форма колебаний				
				условные ординаты X^T_{1s}	условная горизонтальная нагрузка $P_s = Q_s X^T_{1s}$	коэффициент формы колебаний η_{1s}	период колебаний T_1 и β_1	сейсмическая сила S_s в т	условные ординаты X^T_{2s}	условная горизонтальная нагрузка $P_s = Q_s X^T_{2s}$	коэффициент формы колебаний η_{2s}	период колебаний T_2 и β_2	сейсмическая сила S_s в т
8	2,22	24	1	1	2,22	2,18		1,21	—1	—2,22	—1,53		—1,49
7	4,44	21	0,88	0,835	3,71	1,82		2,02	—0,424	—1,88	—0,65		—1,39
6	4,44	18	0,75	0,657	2,92	1,43		1,58	0,162	0,72	0,25		5 33
5	29,4	15	0,63	0,5	14,7	1,09		8	0,508	14,92	0,78		11
4	29,4	12	0,5	0,34	10	0,74		5,45	0,715	21	1,09		15,4
3	29,4	9	0,38	0,211	6,21	0,46		3,38	0,653	19,2	1		14,1
2	29,4	6	0,25	0,1	2,94	0,22		1,61	0,414	12,17	0,63		8,91
1	16,6	3	0,12	0,029	0,48	0,063		0,26	0,145	2,41	0,22		1,76

$T_1 = 0{,}58$ *сек* $\beta_1 = 2{,}5$

$T_2 = 0{,}268$ *сек* $\beta = 4{,}8$

Две расчетные схемы показаны на рис. 22. Так как отношение $\frac{h}{a} = h_0 = \frac{15,1}{1,6} = 9,4$, то всю жидкость можно рассматривать как твердое тело, поскольку коэффициент $\tilde{k}_1 \approx 1$ (см. рис. 22,*а*). Результаты вычислений по расчетной схеме рис. 22,*а* приведены в табл. 6.

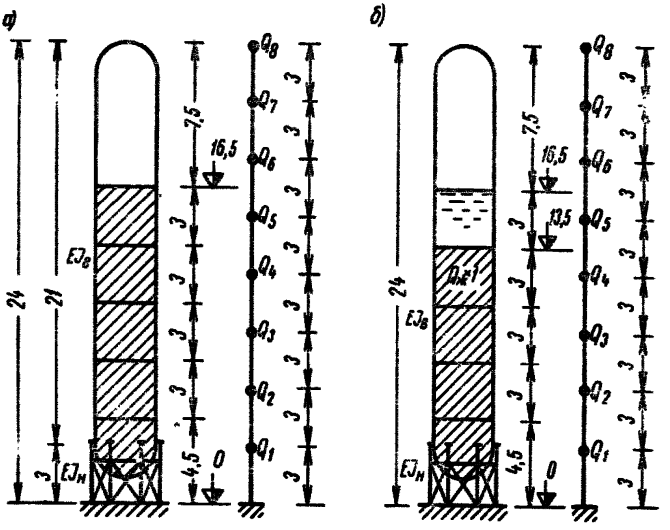


Рис. 22. Расчетные схемы газгольдера, частично заполненного жидкостью

Для сравнения рассмотрим также вариант расчета (см. рис. 22,*б*), считая, что жидкость только до отметки +13,5 *м* — твердое тело, так как процесс волнообразования на поверхности жидкости будет весьма слабо сказываться на глубинах ниже отметки +13,5.

Жидкость между отметками 13,5 и 16,5 считаем заключенной в цилиндрическом резервуаре с высотой $h = 3$ *м*. Вычислим

$$\tilde{\omega}_1 = \sqrt{\frac{1,84 \cdot 980}{160} \operatorname{th}\left(1,84 \frac{3}{1,6}\right)} = 3,38 \text{ 1/сек.}$$

Приведенный вес жидкости между отметками +13,5 и +16,5 в точке 5 для $\frac{h}{a} = \frac{3}{1,6} \approx 2$; $\tilde{k}_1 = 0,75$ равен

$$Q_{ж,5} = 8,35 \cdot 3 \tilde{k}_1 = 25 k_1 = 25 \cdot 0,75 = 18,8 \text{ т.}$$

Таблица 7

№ точек (S)	Вес Q_s в т	Расстояние от основания h_s в м	Отношение высоты h_s h_s/H	Первая форма колебаний: условные ординаты X^T_{1s}	условная горизонтальная нагрузка $P_s=Q_sX_{1s}$	коэффициент формы колебаний η_{1s}	период колебаний T_1 и β_1	сейсмические силы S_s в m	Вторая форма колебаний: условные ординаты X^T_{2s}	условная горизонтальная нагрузка $P_s=Q_sX_{2s}$	коэффициент формы колебаний η_{2s}	период колебаний T_2 и β_2	сейсмические силы S_s в m
8	2,22	24	1	1	2,22	2,22		1,33	—1	—2,22	—1,51		—1,65
7	4,44	21	0,88	0,835	3,71	1,85		2,22	—0,424	—1,88	—0,64		—1,34
6	4,44	18	0,75	0,657	2,82	1,46	$\beta_1=2,7$	1,75	0,162	0,72	0,24	$\beta_2=4,8$	0,51
5	23,2	15	0,63	0,5	11,6	1,11		6,95	0,508	11,79	0,77		8,6
4	29,4	12	0,5	0,34	10	0,75		5,95	0,715	21	1,08		15,3
3	29,4	9	0,38	0,211	6,21	0,47	$T_1=0,56$ сек	3,73	0,653	19,2	0,99	$T_2=0,256$ сек	14
2	29,4	6	0,25	0,1	2,94	0,22		1,75	0,414	12,17	0,63		8,92
1	18,6	3	0,125	0,29	0,48	0,064		0,287	0,145	2,41	0,29		1,76

Верхняя часть жидкости рассматривается подвижной.

В табл. 7 приведены результаты вычислений по расчетной схеме 22,*б*.

Как видно из выполненных расчетов (табл. 6 и 7), подвижность жидкости сказывается на величинах сейсмических сил незначительно. Это объясняется тем, что газгольдер представляет собой «резервуар» с очень большим отношением высоты налива к радиусу.

Пример 6

Газгольдер переменного объема

На рис. 11 показана схема газгольдера переменного объема[1]. Как видно из рисунка, газгольдер состоит из резервуара, заполненного жидкостью до отметки не более +9 *м*, телескопа и колокола. Для пригрузки колокола на отметках +27,4 *мм* и +18,6 *м* по всему периметру устанавливаются бетонные и чугунные грузы.

На рис. 11 показано крайнее верхнее положение колокола, в этом положении газгольдер имеет максимальный объем. К резервуару по наружному контуру крепится сквозная решетчатая конструкция, по стойкам которой с помощью роликов перемещается телескоп и колокол. Эта решетчатая конструкция играет роль направляющих для телескопа и колокола и воспринимает сейсмическую нагрузку. Решетчатая направляющая конструкция является жесткой пространственной конструкцией с большим числом связей.

Основные размеры конструкции указаны на рис. 11. Резервуар газгольдера заполнен водой, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 0{,}02$ *см*^{2}/*сек*. Район строительства с сейсмической активностью 9 баллов: $k_c = 0{,}1$.

Для крайнего верхнего положения колокола величина зазора A_s между уровнем жидкости и покрытием не рассчитывается.

По формулам (1.1) и (1.3) вычисляем $\widetilde{\omega}_1$ и $\widetilde{\nu}_1$:

$$h_0 = \frac{9}{13{,}56} = 0{,}662,$$

$$\widetilde{\omega}_1 = \sqrt{\frac{1{,}84 \cdot 9{,}8}{13{,}56} \operatorname{th}(1{,}84 \cdot 0{,}662)} = 1{,}05 \ 1/\text{сек},$$

[1] Конструкция газгольдера разработана институтом Проектстальконструкция.

$$\widetilde{\nu_1}=7{,}3\,\frac{\sqrt{0{,}02}}{1356\sqrt[4]{1356}}=0{,}000125\ 1/сек.$$

Вычисляем максимальные значения гидродинамического давления для $y/h=0$; 0,5; 1 по формулам (1.6), (1.7):

$$\sqrt{1-e^{-60\cdot 0{,}000125}}=0{,}0835;$$

$$y/h=0;\quad E_1=0{,}19;\quad \xi_p=4{,}5;$$

$$P(0)=1\cdot 13{,}56\cdot 0{,}1\cdot 4{,}5\cdot 0{,}0835=0{,}509\ т/м^2;$$

$$y/h=0{,}5;\quad E_1=0{,}153;\quad \xi_p=5{,}05;$$

$$P(0{,}5\,h)=1\cdot 13{,}56\cdot 0{,}1\cdot 5{,}05\cdot 0{,}0835=0{,}572\ т/м^2;$$

$$y/h=1;\quad E_1=0;\quad \xi_p=6{,}06;$$

$$P(1\,h)=1\cdot 13{,}56\cdot 0{,}1\cdot 6{,}06\cdot 0{,}0835=0{,}686\ т/м^2.$$

На рис. 23 построена эпюра $P(y)$.

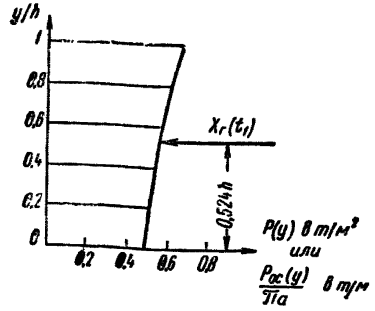


Рис. 23. Эпюра гидродинамического давления

По формуле (1.10) вычисляем $X_г$

$$E_1=0{,}418-0{,}237\,\frac{\text{th}\,(1{,}84\cdot 0{,}662)}{0{,}662}=0{,}118,$$

$$\xi_p=5{,}3,$$

$$X_г=3{,}14\cdot 13{,}56^2\cdot 9\cdot 1\cdot 0{,}1\cdot 5{,}3\cdot 0{,}0835=230\ т.$$

Величина $h_c=0{,}524$ (см. рис. 23). По формуле (1.14) вычисляем q_{max}:

$$q_{max}=\frac{230\cdot 0{,}524\cdot 9}{3{,}14\cdot 13{,}56}=1{,}88\ т/м.$$

Давление $P(y)$ в плане распределено по закону синуса (см. рис. 4,*б*). Контурное давление $q(\theta)$, передаваемое на фундамент газгольдера, также распределяется по закону синуса (см. рис. 4,*в*).

Для определения сейсмических сил от веса конструкций газгольдера примем расчетную схему, показанную на рис. 14.

Приближенная оценка периода колебаний решетчатой направляющей конструкции показывает, что он для первой формы равен примерно 0,1 *сек*. Поэтому для расчета можно принять, что жесткость системы равна бесконечности:

Вес Q_2:

вес крыши колокола $3{,}14 \cdot 13{,}05^2 \cdot 100 = 53\,500$ *кГ*;

вес стенки колокола $2 \cdot 3{,}14 \cdot 13{,}05 \cdot 4{,}4 \cdot 80 = 28\,800$ *кГ*;

вес решетчатой направляющей конструкции $6{,}28 \cdot 14 \cdot 50 + 12{,}5 \cdot 50 = 7400$ *кГ*;

вес бетонных грузов: 28 000 *кГ*

Итого 117 700 *кГ* = 117,7 *т*

Вес Q_1:

вес стенки колокола 28 800 *кГ*;

вес телескопа $6{,}28 \cdot 13{,}5 \cdot 9{,}4 \cdot 80 = 6400$ *кГ*;

вес решетчатой направляющей конструкции со смотровой площадкой: $4400 + 8650 + 4400 = 174\,500$ *кГ*;

вес чугунных грузов 55 000 *кГ*

Всего 165 250 *кГ* = 165 *т*

Коэффициент динамичности $\beta = 3$.

Сейсмические силы равны:

$$S_2 = Q_2 \kappa_c \eta_2 \beta = 117{,}7 \cdot 0{,}1 \cdot 1 \cdot 3 = 35{,}31 \text{ т};$$

$$S_1 = Q_1 \kappa_c \eta_1 \beta = 165 \cdot 0{,}1 \cdot 1 \cdot 3 = 49{,}5 \text{ т}.$$

Расчетом определены суммарные значения сейсмических сил S_1 и S_2, которые должны быть распределены по элементам конструкции. Особенность данной конструкции такова, что силы S_1 и S_2 передаются на стойки решетчатой направляющей конструкции. Силы $N_{\alpha 1}, \ldots, N_{4\alpha}$ вычисляем по формулам (2.3):

На уровне $\nabla + 27{,}44$ *м*:

$$N_{12} = 0{,}258 \cdot 35{,}2 = 9{,}1 \text{ т};$$

$$N_{22} = 0{,}224 \cdot 35{,}2 = 7{,}9 \text{ т};$$

$$N_{32} = 0{,}130 \cdot 35{,}2 = 4{,}57 \text{ т};$$

$$N_{42} = 0{,}017 \cdot 35{,}8 = 0{,}6 \text{ т}.$$

На уровне $\nabla +13{,}6$ *м*:

$$N_{11} = 0{,}258 \cdot 49{,}5 = 12{,}8 \text{ т}.$$

$$N_{21} = 0{,}224 \cdot 49{,}5 = 11{,}1 \text{ т};$$

$$N_{31} = 0{,}130 \cdot 49{,}5 = 6{,}43 \text{ т};$$

$$N_{41} = 0{,}017 \cdot 49{,}5 = 0{,}842 \text{ т}.$$

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
1. Определение расчетной сейсмической нагрузки для частично заполненных резервуаров	4
2. Определение расчетной сейсмической нагрузки на мокрые газгольдеры	21
3. Примеры расчета	27
Пример 1. Круглый цилиндрический резервуар емкостью 2000 $м^3$	27
Пример 2. Круглый цилиндрический резервуар емкостью 50 000 $м^3$ с плавающим понтоном	31
Пример 3. Сферический резервуар	33
Пример 4. Расчет конструкций, поддерживающих сферические резервуары	34
Пример 5. Вертикальный газгольдер постоянного объема	36
Пример 6. Газгольдер переменного объема	43

ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко
Госстроя СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ РЕЗЕРВУАРОВ И ГАЗГОЛЬДЕРОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

* * *

Стройиздат
Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9

Редактор издательства *Г. А. Ифтинка*
Технический редактор *Д. Я. Касимов*
Корректор *Е. Н. Кудрявцева*

Сдано в набор 29/V—1969 г.
Подписано к печати 22/X—1969 г.
Т-12960 Бумага 84×108 1/32 — 0,75 бум. л.
2,52 усл. печ. л. (уч.-изд. 2,1 л.).
Гираж 19000 экз. Изд. № XII-2011.
Зак. № 279. Цена 11 коп.

Подольская типография Главполиграфпрома.
Комитета по печати при Совете Министров СССР
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25.

gost.e-ecolog.ru