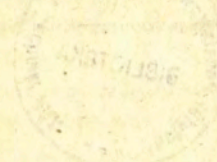


4 / 1980

Zbigniew F. Baczyński

EFEKTY SEJSMICZNE
W ZBIORNIKACH STAŁOWYCH
NA PALIWA PŁYNNE



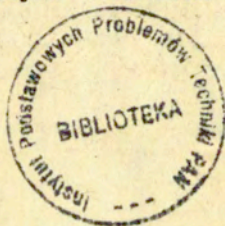
p. 269

WARSZAWA 1980

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 4 lutego 1980 r.

Zarejestrowana pod nr 4/1980

Praca niniejsza powstała w Zakładzie Teorii Konstrukcji
IPPT PAN dzięki zainteresowaniu Biura Projektów CPN
"Naftoprojekt" w Warszawie



57169



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 160 egz. Ark. wyd. 1,3. Ark. druk. 2.
Oddano do drukarni w marcu 1980 r.
Nr zamówienia 170/0/80 m.183

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich

Zbigniew F. Baczyński,
Zakład Teorii Konstrukcji, IPPT PAN

EFEKTY SEJSMICZNE W ZBIORNIKACH STAŁOWYCH NA PALIWA PŁYNNIE

1. Uwagi wstępne

W wielu krajach wysoce rozwiniętych pojemność urządzeń do magazynowania paliw płynnych staje się coraz większa, a to w celu zapewnienia stałego zaopatrzenia w paliwa płynne. W konsekwencji tego, rozmiary zbiorników na paliwa płynne wyraźnie rosną i osiągają pojemności 100 000 m³ do 150 000 m³ z powodów czysto ekonomicznych. Obszary zajęte przez zbiorniki na paliwa płynne stanowią obecnie 70% do 80% obszaru rafinerii. Jeśli w tej sytuacji nastąpiłaby awaria zbiorników paliw płynnych podczas trzęsienia ziemi, to wtedy katastrofa sięgnęłaby daleko poza obszar rafinerii zagrażając naturalnemu środowisku.

Jak dotychczas, zagadnienia obliczania i projektowania zbiorników na paliwa płynne nie zostały zbadane i przestudiowane tak dobrze jak w przypadku innych konstrukcji inżynierskich.

Jak wiadomo, wielkie zbiorniki na paliwa płynne są konstrukcjami powłokowymi pracującymi na ogół, pod wpływem obciążeń normalnych, w błonowym stanie napięcia. Taki konstrukcyjny kształt nie musi być wcale słaby dla przenoszenia obciążeń wywołanych trzęsieniem ziemi. Niemniej jednak, taka konstrukcja ma pewne nieciągłości (geometrii i sztywności) i nie tworzy całkowicie błonowej konstrukcji. Te powody nasuwają konieczność opracowania efektywnej metody obliczania i projektowania zbiorników na paliwa płynne, które poddane są działaniu obciążeń sejsmicznych. Niniejszy raport obejmuje głównie analizę obciążeń sejsmicznych i sposób ich wyznaczania w konstrukcjach stalowych zbiorników cylindrycznych z dachami stałymi i pływającymi. Analiza naprężeń wywołanych obciążeniami sejsmicznymi w takich konstrukcjach będzie przedmiotem odrębnego raportu.

Charakter obciążeń w zbiornikach paliw płynnych podczas trzęsienia ziemi

(i) Przyspieszeniowy charakter ruchu powierzchni ziemi

Ruchy ziemi obserwowane i mierzone za pomocą zwykłych akcelerometrów są definiowane jako pewne przyspieszenia powierzchni ziemi. Ten typ ruchu powierzchni ziemi obejmuje pewne okresy krótsze niż 2 sekundy, a najczęściej okres 0,1 sek do 0,5 sek. Tak więc, reakcja cieczy w postaci pierwszej formy ruchu, w zbiornikach o pojemności powyżej 10 000 m³, jest zaledwie zapoczątkowana, ponieważ okres pierwszej naturalnej formy ruchu kołyszącej się cieczy jest dłuższy niż 5 sekund. Z tego powodu obliczenia sprawdzające konstrukcję zbiornika na obciążenia sejsmiczne powinny być przeprowadzone przy tym typie ruchu powierzchni ziemi w poziomie posadowienia zbiornika przy założeniu, że ciecz wewnątrz zbiornika zachowuje się jak ciało sztywne. Przy obliczaniu reakcji cieczy, w przypadku krótkiego okresu przyspieszeniowego ruchu ziemi, należy przyjmować przyspieszenia o wartości 0,3g do 0,45g (gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim).

(ii) Przemieszczeniowy charakter ruchu powierzchni ziemi

Przemieszczeniowe formy ruchu ziemi w przypadkach długich okresów nie są możliwe do zarejestrowania przy pomocy zwykłych akcelerometrów, i definiuje się je jako pewne przemieszczenia powierzchni ziemi. Ten typ ruchu powierzchni ziemi obejmuje dłuższe okresy przewyższające 2 sekundy. Zakłada się, że okres przemieszczeniowego ruchu ziemi obserwowany i mierzony w poziomie posadowienia zbiornika jest taki sam jak pierwszy naturalny okres ruchu kołyszącej się w zbiorniku cieczy. Jednocześnie zakłada się, że ruch ten przebiega w postaci pewnej funkcji sin(.) przebiegającej w trzech cyklach z przemieszczeniami rzędu 40 cm do 60 cm.

(iii) Wybór miarodajnej formy ruchu

Obliczenia sprawdzające konstrukcję zbiornika na działanie obciążeń sejsmicznych powinny być przeprowadzone na ogół na te dwa wyżej wymienione typy ruchów powierzchni ziemi, a następnie bardziej niekorzystny powinien być wybrany jako miarodajny.

2. Wyznaczanie obliczeniowego obciążenia sejsmicznego dla częściowo napełnionego zbiornika

2.1. Założenia

Dla wyznaczenia poziomych i pionowych obciążeń działających na konstrukcję stalowego zbiornika cylindrycznego pod wpływem trzęsienia ziemi zakładamy co następuje:

- zbiornik z dachem pływającym lub stałym traktuje się jak konstrukcję sztywną;
- ciecz wypełniająca zbiornik uważamy za ciecz mającą własności cieczy lepkiej;
- ruch sejsmiczny podłoża jest losowym procesem czasu lub impulsem;
- rozpatruje się przejściowy proces ruchu cieczy w zbiorniku przyjmując, że długość okresu trzęsienia ziemi trwa maksymalnie 30 sekund;
- rozpatruje się poziome ruchy zbiornika i pionowy sejsmiczny wstrząs;
- dane są informacje do obliczeń na podstawie dwunastostopniowej skali MCS (Mercalli, Cancani, Sieberg) lub MSK (Medvedev, Sponheuer, Karnih).

Pełne sejsmiczne obciążenie działające na zbiornik składa się z obciążenia od ciężaru konstrukcji i z obciążenia od ciężaru cieczy wypełniającej zbiornik.

Poziome siły sejsmiczne działające na zbiornik wywołane bezwładnością konstrukcji można wyznaczać w sposób proponowany w normach radzieckich (SNiP II-A.12-69*) [1], jak dla sztywnych konstrukcji, których fundament jest na tyle rozbudowany w planie, że obrotu budowli (zbiornika) na sprężystym podłożu, przy wyznaczaniu sejsmicznego oddziaływania, można nie uwzględniać.

Zbiornik oblicza się na poziome i pionowe siły hydrodynamiczne; dno zbiornika oblicza się na obciążenie konturowe, które przekazywane jest przez powłokę cylindryczną. Te hydrodynamiczne obciążenia sumuje się z hydrostatycznymi obciążeniami cieczą działającymi na powłokę cylindryczną i płytę denną zbiornika.

W celu uniknięcia hydrodynamicznego "wyniesienia" pontonu ponad górny brzeg powłoki cylindrycznej zbiornika, na skutek rozwijającej się w zbiorniku fali, określa się niezbędną wysokość A_s ; "zapas" pomiędzy poziomem cieczy, a krawędzią zbiornika, jeśli częstość fali pierwszej formy jest większa niż 1/sek.

2.2. Zbiornik cylindryczny z dachem stałym

Częstość kołową pierwszej naturalnej formy ruchu kołyszącej się w zbiorniku cieczy oblicza się według wzoru [2]:

$$(1) \quad w_1 = \sqrt{(1,84 g/R) \operatorname{th}(1,84 H/R)}, \quad (R, H \text{ w metrach}),$$

gdzie oznaczono: R - wewnętrzny promień powłoki cylindrycznej,
 H - wysokość słupa cieczy w stanie spoczynku,
 g - przyspieszenie ziemskie (w m/sek^2),
 th - tangens hiperboliczny.

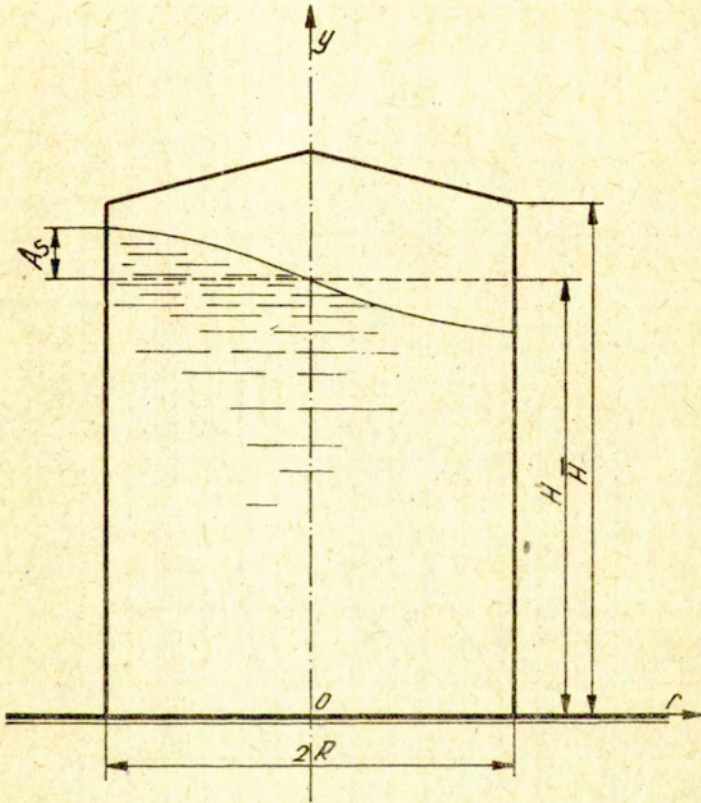
(i) Jeśli $w_1 > 1/\text{sek}$, to dalsze obliczenia należy prowadzić według wzorów (6)+(14).

(ii) Jeśli $w_1 \leq 1/\text{sek}$, to obliczenia prowadzi się według wzorów (15)+(21).

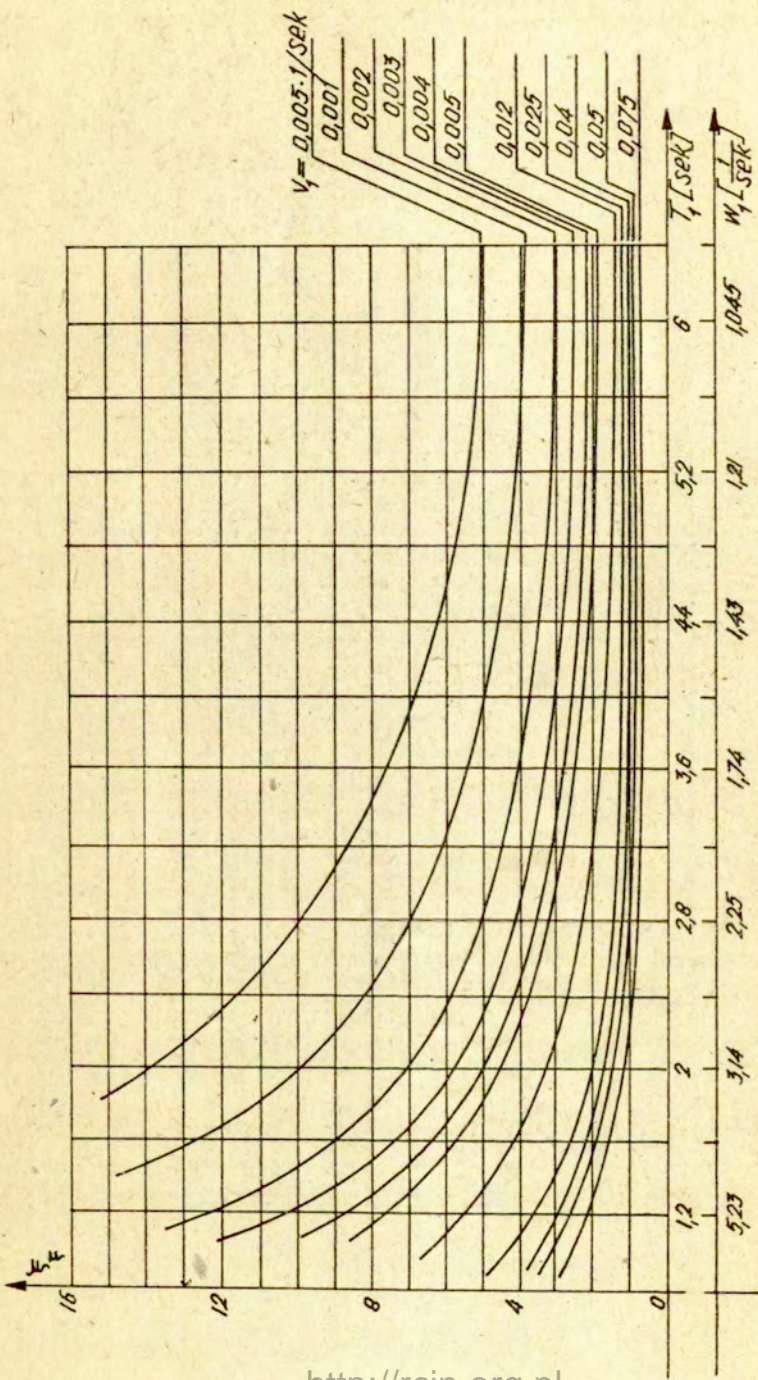
Wielkość zapasu A_s pomiędzy poziomem cieczy, a dolną krawędzią konstrukcji dachowej zbiornika określa się według wzoru

$$(2) \quad A_s = 0,836 R k_s \xi_F \sqrt{1 - e^{-60v_1}}, \quad (\text{por. rys. 1}),$$

gdzie oznaczono: k_s - współczynnik sejsmiczności, zależny od stopnia zagrożenia sejsmicznego, który proponuje się przyjmować według norm radzieckich [1], [3];
 e - podstawa logarytmów naturalnych;
 ξ_F - współczynnik, który odczytuje się z rys. 2 w zależności od parametru charakteryzującego zanikanie (v_1), który to parametr oblicza się według wzorów (3) lub (4), i od częstości kołowej pierwszej formy w_1 .



Rys. 1. Schemat zbiornika cylindrycznego;
podstawowe wymiary i oznaczenia.



Rys. 2. Wykresy współczynnika k_f dla obliczenia wysokości fali w zbiorniku cylindrycznym.

Dla dowolnego stosunku H/R mamy:

$$(3) \quad v_1 = \xi_v \sqrt{k} / R \sqrt[4]{R},$$

gdzie ξ_v - współczynnik, który odczytujemy z rys. 3 dla danego stosunku $h = H/R$;

k - współczynnik kinematycznej lepkości cieczy (w cm^2/sek);

R - wewnętrzny promień powłoki cylindrycznej (w cm).

Dla $H > R$ ($h > 1$), mamy:

$$(4) \quad v_1 = 5,98 \sqrt[4]{\text{th}(1,84 h)} \cdot \sqrt{k} / R \sqrt[4]{R},$$

Niektóre wartości współczynnika kinematycznej lepkości cieczy podano dla orientacji w tabelicy 1.

Jeśli $1 \leq w_1 \leq 6$ (1/sek), to wtedy wielkość zapasu A_s obliczamy ze wzoru:

$$(5) \quad A_s = 0,0836 (w_1 / \sqrt{v_1}) \cdot R k_s \sqrt{1 - e^{-60v_1}}.$$

Hydrodynamiczne obciążenie cieczą powłoki cylindrycznej zbiornika oblicza się według wzorów:

$$(6) \quad P(y) = P_{\max}(y) \cos\theta, \quad \text{gdzie oznaczono:}$$

$$(7) \quad P_{\max}(y) = \delta R k_s \xi_r \sqrt{1 - e^{-60v_1}},$$

δ - ciężar objętościowy cieczy wypełniającej zbiornik,

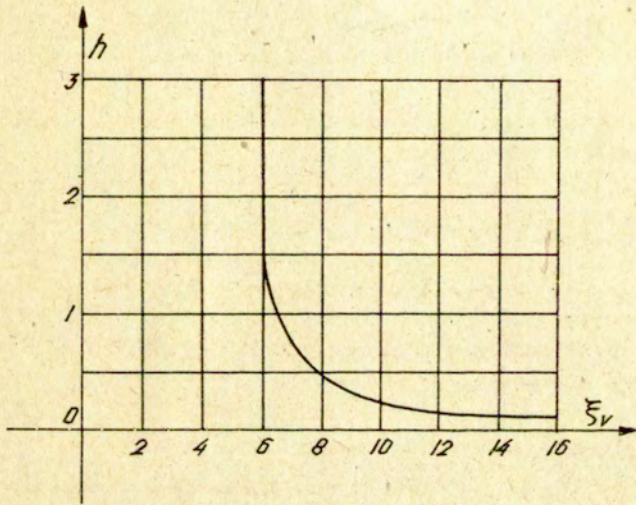
ξ_r - współczynnik dynamiczny, który odczytujemy z tabelicy 2, w zależności od: v_1 , w_1 , $E_1(y)$ przy czym E_1 jest następującą wartością funkcji:

$$(8) \quad E_1(y) = 0,418 \left[1 - \frac{\text{ch}(1,84hy/H)}{\text{ch}(1,84h)} \right],$$

ch - cosinus hiperboliczny,

y - współrzędna cylindryczna mierzona od podstawy powłoki w kierunku jej osi (por. rys. 4a),

θ - współrzędna cylindryczna (kąt poziomy) mierzona jak na rys. 4b.



Rys. 3. Wykres współczynnika ξ_v jako funkcji $h = H/R$ do obliczania zbiorników cylindrycznych.

Tablica 2. Współczynniki dynamiczne k_r *

$w_1 \backslash E_1$	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0
$v_1 = 0,075 \text{ 1/sek}$						
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
$v_1 = 0,06 \text{ 1/sek}$						
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
$v_1 = 0,041 \text{ 1/sek}$						
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
$v_1 = 0,025 \text{ 1/sek}$						
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

* / Tablica 2 zaczerpnięta została z literatury [4].

Tablica 2. Współczynniki dynamiczne t_R (c.d.)

$w_1 \backslash E_1$	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0
----------------------	-----	-----	-----	-----	------	---

$v_1 = 0,005$ 1/sek

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

$v_1 = 0,004$ 1/sek

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

$v_1 = 0,003$ 1/sek

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

Tablica 2. Współczynniki dynamiczne k_r (c.d.)

$\frac{E_1}{w_1}$	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0
-------------------	-----	-----	-----	-----	------	---

$$v_1 = 0,002 \text{ 1/sek}$$

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

$$v_1 = 0,001 \text{ 1/sek}$$

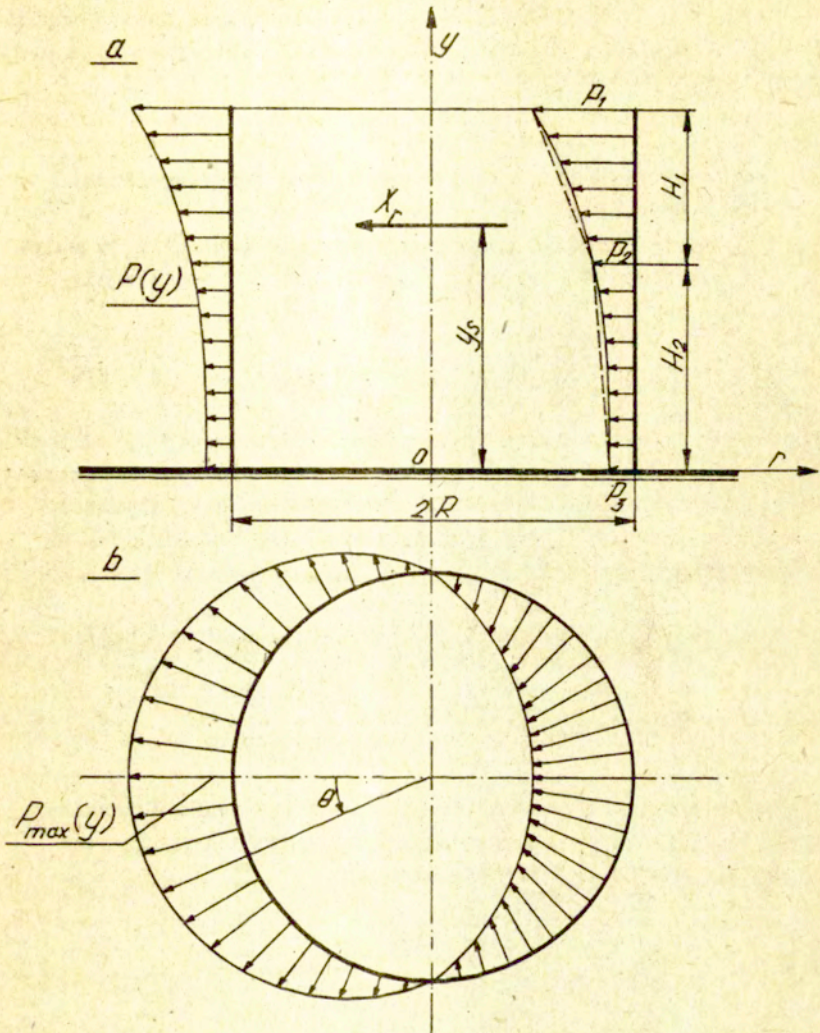
10	8,44	16,81	25,2	33,6	37,81	42
6	4,22	8,29	12,42	16,58	18,65	20,71
4	2,7	5,2	7,78	10,36	11,64	12,95
3	2,06	3,84	5,65	7,59	8,55	9,49
2,5	1,76	3,18	4,71	6,97	7,04	7,83
2	1,47	2,56	3,75	4,25	5,59	6,21
1	1,13	1,62	2,11	2,63	3,12	3,75

$$v_1 = 0,0005 \text{ 1/sek}$$

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

$$v_1 = 0,0001 \text{ 1/sek}$$

2	—	—	7,2	9,8	11,4	13,4
1	—	—	4,6	5,5	6	6,6



Rys. 4. Wykresy rozkładów obciążenia hydrodynamicznego cieczą w zbiorniku cylindrycznym; a) rozkład w przekroju południkowym; b) rozkład w przekroju równoleżnikowym.

Wypadkowa hydrodynamicznego obciążenia cieczą powłoki cylindrycznej zbiornika (całkowita siła pozioma) jest wyznaczana przy pomocy wzoru:

$$(9) \quad X_R = Q_c k_s \xi_r \sqrt{1 - e^{-60v_1}},$$

gdzie:

Q_c - ciężar całej cieczy w zbiorniku (przy wysokości napełnienia H ,

ξ_r - współczynnik dynamiczny podany w tabelicy 2, w zależności od: w_1 , v_1 , E_1 , przy czym E_1 oblicza się ze wzoru:

$$(10) \quad E_1 = 0,418 - 0,237 \operatorname{th}(1,84h) / h, \quad h = H/R.$$

Współrzędna y_s określająca położenie siły wypadkowej X_R od podstawy powłoki odpowiada środkowi pola obciążenia hydrodynamicznego. Dla przybliżonego określenia tej współrzędnej dopuszcza się zamianę krzywej $P_{\max}(y)$ przez łamaną (dwa trapezy) jak na rys. 4a. Mamy więc,

$$(11) \quad y_s = 0,5 (P_1 + P_2) H_1 \left[\frac{H_1}{3} \cdot \frac{(2P_1 + P_2)}{(P_1 + P_2)} + H_2 \right] + 0,5 \left[\frac{H_2^2}{3} \cdot \frac{(2P_2 + P_3)}{H_2} \right] \cdot \left[0,5 (P_1 + P_2) H_1 + 0,5 (P_2 + P_3) H_2 \right]^{-1}.$$

Obciążenie konturowe działające na płytę denną zbiornika, a wywołane momentem sił działających na powłokę cylindryczną oblicza się według wzoru (por. rys. 5):

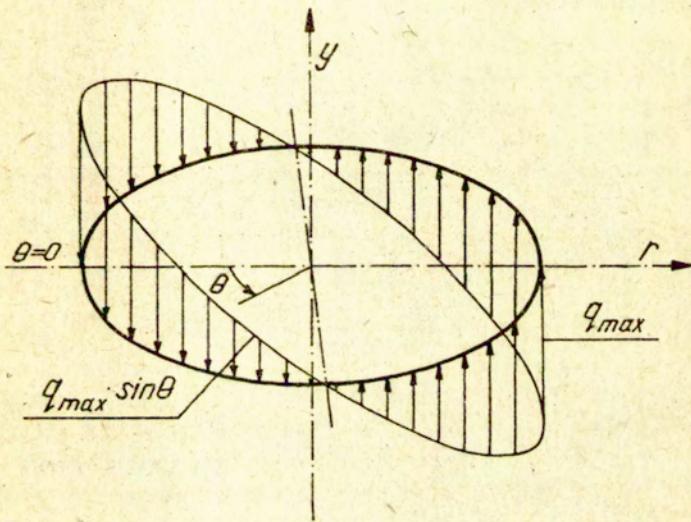
$$(12) \quad q(\theta) = q_{\max} \cdot \cos\theta,$$

gdzie

$$(13) \quad q_{\max} = X_R y_s / \pi R^2.$$

Jeśli częstość pierwszej formy ruchu kołyszącej się w zbiorniku cieczy jest $w_1 \leq 1/\text{sek}$, to nie sprawdza się amplitudy fali A_s .

W przypadku $w_1 \leq 1/\text{sek}$, hydrodynamiczne obciążenie cieczą powłoki cylindrycznej zbiornika wyznacza się według wzorów:



Rys. 5. Wykres obciążenia konturowego działającego na płytę denną zbiornika cylindrycznego.

$$(14) \quad P(y) = P_{\max}(y) \cdot \cos\theta,$$

gdzie:

$$(15) \quad P_{\max}(y) = \delta R k_s K_1,$$

$$(16) \quad K_1 = 1 - 0,836 \left[\frac{\text{ch}(1,84hy/H)}{\text{ch}(1,84h)} \right],$$

δ - ciężar objętościowy cieczy.

Na rys. 6, przytoczone zostały wykresy współczynnika K_1 dla różnych wartości $h = H/R$ i zmiennych bezwymiarowych y/H .

W przypadku $w_1 \leq 1/\text{sek}$, wypadkowa X_r hydrodynamicznego obciążenia ciecżą powłoki zbiornika (całkowita siła pozioma) określana jest wzorem

$$(17) \quad X_r = Q_c k_s k_1,$$

gdzie:

Q_c - ciężar całej cieczy,

k_1 - współczynnik, który odczytujemy z rys. 7 w zależności od $h = H/R$.

Współrzedną y_s wyznaczającą linię działania wypadkowej X_r (por. rys. 4a) oblicza się według wzoru

$$(18) \quad y_s = H K_2,$$

zaś współczynnik K_2 odczytujemy z rys. 8, w zależności od $h = H/R$.

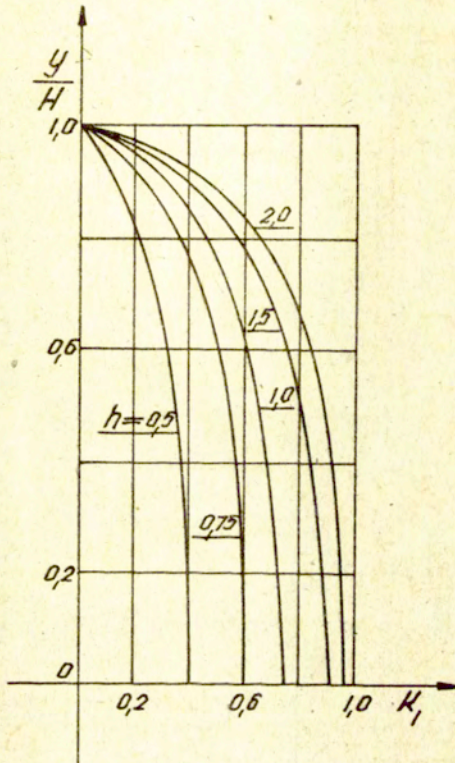
W przypadku $w_1 \leq 1/\text{sek}$, konturowe obciążenie dna zbiornika wywołane momentem sił działających na powłokę cylindryczną zbiornika (patrz rys. 5) wyznacza się według wzoru:

$$(19) \quad q(\theta) = q_{\max} \cdot \cos\theta,$$

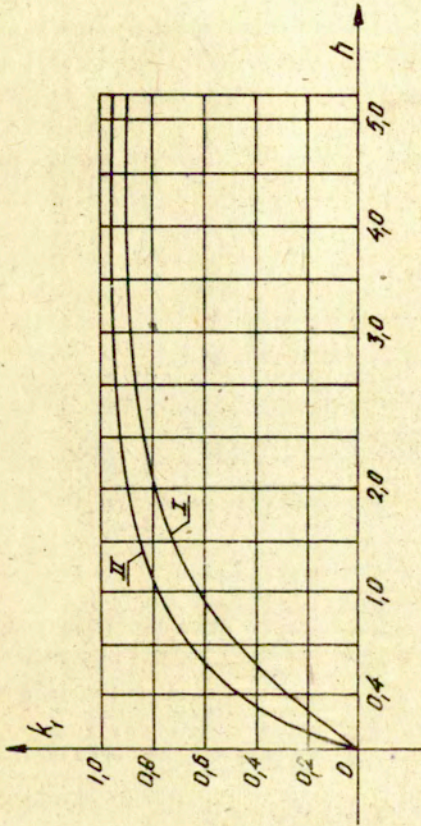
gdzie

$$(20) \quad q_{\max} = \delta H^2 k_s k_1 K_2,$$

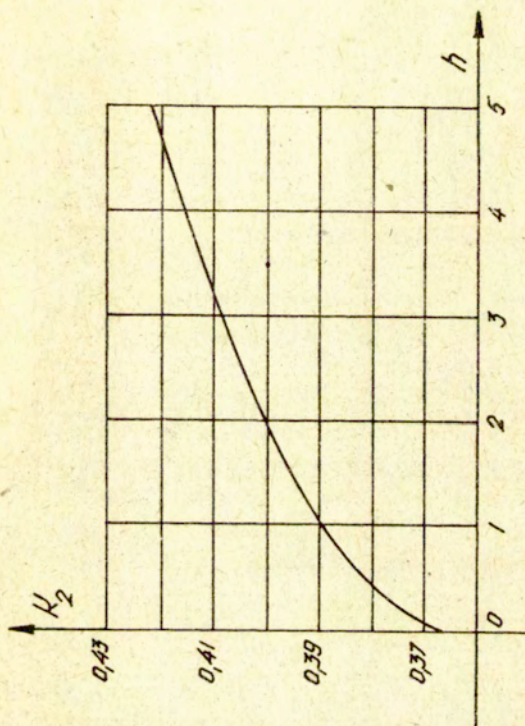
a współczynniki k_s , k_1 , K_2 mają znaczenie jak we wzorach (17) i (18).



Rys. 6. Wykresy współczynnika K_1 dla różnych wartości $h = H/R$ zmiennych bezwymiarowych y/H .



Rys. 7. Wykresy współczynnika k_1 jako funkcji $h = H/R$;
(I) dla zbiornika cylindrycznego;
(II) dla zbiornika prostokątnego.



Rys. 8. Wykres współczynnika K_2 jako funkcja $h = H/R$.

2.3. Zbiornik cylindryczny z dachem pływającym

W zbiornikach z dachami pływającymi nie przeprowadza się w zasadzie obliczeń amplitudy fali A_s kołyszącej się cieczy.

Hydrodynamiczne obciążenie cieczą powłoki cylindrycznej zbiornika jest rozłożone równomiernie wzdłuż wysokości i zmienia się według funkcji $\cos(\cdot)$ na obwodzie. Wyznacza się je według wzoru:

$$(21) \quad P = P_{\max} \cdot \cos\theta,$$

gdzie:

$$(22) \quad P_{\max} = \left[1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84h) \right] \delta R k_s,$$

$$h = H/R.$$

Wypadkowa obciążenia hydrodynamicznego cieczą powłoki cylindrycznej wyznacza się ze wzoru:

$$(23) \quad X_r = Q_c \left[1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84h) \right] k_s,$$

$$(24) \quad Y_s = H/2.$$

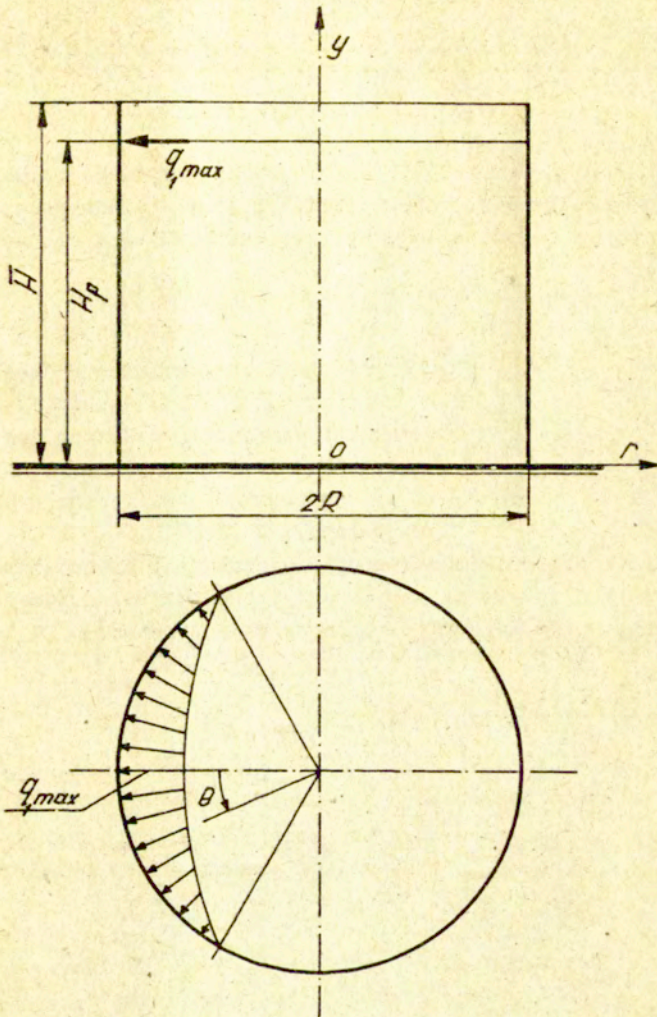
Konturowe obciążenie działające na dno zbiornika (rys. 6) wywołane momentem sił działających na powłokę cylindryczną rozkłada się na płytę denną według funkcji $\cos(\cdot)$ i wyraża się wzorem:

$$(25) \quad q(\theta) = q_{\max} \cdot \cos\theta,$$

gdzie

$$(26) \quad q_{\max} = X_r H / 2 \pi R^2.$$

Dla zbiorników przeznaczonych dla obszarów sejsmicznych, najodpowiedniejszym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest dach pływający z miękkim zamknięciem przestrzeni pomiędzy powłoką cylindryczną i pontonem. Obciążenie sejsmiczne wywołane ciężarem dachu pływającego rozkłada się według funkcji $\cos(\cdot)$ i przenosi się na powłokę cylindryczną, przy czym największy efekt jest przy skrajnym górnym położeniu pontonu (patrz rys. 9); oblicza się według wzoru:



Rys. 9. Wykres rozkładu obciążenia powłoki cylindrycznej wywołanego poziomym ruchem dachu pływającego na wysokości H_p .

$$(27) \quad q_1(\theta) = q_{1(\max)} \cdot \cos(\pi + 3\theta/2), \quad |\theta| = \pi/3,$$

gdzie

$$(28) \quad q_{1(\max)} = 2,4 P_d k_s/R,$$

P_d - ciężar dachu pływającego.

Sejsmiczne obciążenie cieczą powłoki cylindrycznej zbiornika przy pionowym sejsmicznym wstrząsie oblicza się według wzoru:

$$(29) \quad P_v = 3 k_s P_h,$$

gdzie

P_h - hydrostatyczne obciążenie cieczą,

P_v - hydrodynamiczne obciążenie, które wzdłuż wysokości rozłożone jest jak ciśnienie hydrostatyczne; sumuje się ono ze zwykłym obciążeniem hydrostatycznym.

Jeśli zbiornik z dachem pływającym jest nienapełniony, to wtedy dach spoczywa na stojakach; w tym przypadku konstrukcję dachu i stojaki należy obliczać na siły pionowe.

3. Przykłady obliczeń

3.1. Zbiornik stalowy cylindryczny o pojemności $V = 40\,000 \text{ m}^3$ z dachem pływającym

Dane: średnica wewnętrzna zbiornika $2R = 54,860 \text{ m}$;
wysokość zbiornika (od poziomu płyty dennej do górnej krawędzi cylindra) $\bar{H} = 17,100 \text{ m}$;
wysokość słupa cieczy $H = \bar{H} - 0,3 \text{ m} = 16,800 \text{ m}$;
ciężar objętościowy cieczy $\delta = 0,92 \text{ T/m}^3$;
ciężar konstrukcji dachu pływającego $P_d = 167,000 \text{ T}$;
VII strefa zagrożenia sejsmicznego wg skali MCS.

Hydrodynamiczne obciążenie powłoki zbiornika cieczą jest rozłożone równomiernie wzdłuż wysokości i zmienne na obwodzie według funkcji $\cos\theta$, gdzie θ jest kątem poziomym mierzonym od płaszczyzny symetrii obciążenia ($\theta=0$). Na podstawie wzoru (21) mamy:

$$\begin{aligned} P &= P_{\max} \cos\theta = \sqrt{1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 H/R)} \delta R k_s \cos\theta = \\ &= \sqrt{1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 \cdot 16,8/27,43)} \cdot 0,92 \cdot 27,43 \cdot \\ &\cdot 1/40 \cdot \cos\theta = \underline{0,1266 \cdot \cos\theta} \dots (\text{T/m}^2) \end{aligned}$$

Tutaj stosownie do założeń o VII strefie zagrożenia sejsmicznego przyjęto współczynnik sejsmiczności $k_s = 1/40$ na podstawie norm radzieckich SNiP II-A.12-69* [1].

Wypadkowa hydrodynamicznego obciążenia cieżką jest wg (23)

$$\begin{aligned} X_T &= Q_c \sqrt{1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 H/R)} k_s = \\ &= \delta \pi R^2 H \sqrt{1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 H/R)} = \\ &= 0,92 \cdot \pi \cdot 27,43^2 \cdot 16,8 \cdot \sqrt{1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 \cdot \\ &\cdot 16,8/27,43)} \cdot 1/40 = \underline{182,6706} \dots (\text{T}) \end{aligned}$$

Odległość wypadkowej X_T od podstawy zbiornika jest wg (24)

$$y_s = H/2 = 16,8/2 = 8,40 \dots (\text{m})$$

Konturowe obciążenie dna zbiornika wywołane momentem sił działających na powłokę zbiornika obliczamy wg (25) i (26):

$$\begin{aligned} q_{\max} &= X_T H / 2 \pi R^2 = 182,6706 \cdot 16,8 / 2 \pi \cdot 27,43^2 = \\ &= \underline{0,6492} \dots (\text{T/m}) \end{aligned}$$

$$q(\theta) = q_{\max} \cos\theta = \underline{0,6492 \cdot \cos\theta} \dots (\text{T/m})$$

Sejsmiczne obciążenie powłoki zbiornika dachem pływającym obliczamy wg (27) i (28):

$$\begin{aligned} q_1(\max) &= 2,4 P_d k_s/R = 2,4 \cdot 167,0 \cdot 1/40 \cdot 1/27,43 = \\ &= \underline{0,3653} \dots (\text{T/m}) \end{aligned}$$

$$q_1(\theta) = q_1(\max) \cdot \cos(\pi + 3\theta/2) = \\ = \underline{0,3653} \cdot \cos(\pi + 3\theta/2) \dots (T/m), \quad -\pi/3 \leq \theta \leq +\pi/3$$

Obciążenie to działa na wysokości pontonu pływającego i jest rozłożone na łuku $(-\pi/3, +\pi/3)$ jak na rys. 8.

Sejsmiczne obciążenie powłoki zbiornika napełnionego cieczą przy pionowym wstrząsie sejsmicznym jest wg (29)

$$P_v(\max) = 3 k_s P_h(\max) = 3 k_s \delta H = 3 \cdot 1/40 \cdot 0,92 \cdot 16,8 = \\ = \underline{1,1592} \dots (T/m^2)$$

Obciążenie hydrostatyczne jest równe

$$P_h(\max) = \delta H = 0,92 \cdot 16,8 = \underline{15,4560} \dots (T/m^2)$$

Całkowite obciążenie powłoki zbiornika wynosi

$$P_{\max} = P_h(\max) + P_v(\max) = 15,4560 + 1,1592 = \\ = \underline{16,6152} \dots (T/m^2)$$

Przyrost obciążenia na skutek działania sejsmicznego (biorąc pod uwagę pionowy sejsmiczny wstrząs jako niekorzystniejszy) wynosi

$$\Delta P = \left[(16,6152 - 15,4560) / 15,4560 \right] \cdot 100 = \underline{7,5\%}$$

Wobec takiego przyrostu obciążenia należałoby zwiększyć grubości blach powłoki cylindrycznej w stosunku do tych, które wynikają z obliczenia statycznego (bez uwzględnienia efektów sejsmicznych). Jeśli jednak w obliczeniach wytrzymałościowych dla obciążeń statycznych przyjęto I rodzaj naprężeń dopuszczalnych, to po uwzględnieniu obciążeń sejsmicznych można przyjąć II rodzaj naprężeń dopuszczalnych.

3.2. Zbiornik stalowy cylindryczny o pojemności $V = 20\ 000\ m^3$
z dachem pływającym

Dane: średnica, wewnętrzna zbiornika $2R = 42,600\ m$;
wysokość zbiornika $H = 15,200\ m$;
wysokość słupa cieczy $H = H - 0,3\ m = 14,900\ m$;
ciężar objętościowy cieczy $\delta = 0,92\ T/m^3$;
ciężar konstrukcji dachu pływającego $P_d = 112,500\ T$;
VII strefa zagrożenia sejsmicznego wg skali MCS.

Hydrodynamiczne obciążenie powłoki zbiornika cieczą jest
równe

$$P = P_{\max} \cos\theta = \left[1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 H/R) \right].$$

$$\cdot \delta R k_s \cos\theta = \left[1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 \cdot 14,9/21,3) \right].$$

$$\cdot 0,92 \cdot 21,3 \cdot 1/40 \cdot \cos\theta = \underline{0,2251} \cdot \cos\theta \dots (T/m^2),$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

Wypadkowa hydrodynamicznego obciążenia wynosi

$$X_r = Q_c \left[1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 H/R) \right] k_s =$$

$$= \delta \pi R^2 \cdot H \left[1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 H/R) \right] k_s =$$

$$= 0,92 \cdot \pi \cdot 21,3^2 \cdot 14,9 \cdot \left[1 - 0,4 / \operatorname{ch}(1,84 \cdot$$

$$\cdot 14,9/21,3) \right] \cdot 1/40 = \underline{224,4444} \dots (T)$$

Położenie wypadkowej X_r jest równe

$$y_s = H/2 = 14,9/2 = \underline{7,45} \dots (m)$$

Konturowe obciążenie dna zbiornika wywołane momentem sił
działających na powłokę zbiornika jest równe:

$$\begin{aligned}q(\theta) &= q_{\max} \cos\theta = (X_r H / 2 \pi R^2) \cos\theta = \\&= (224,4444 \cdot 14,9 / 2 \cdot \pi \cdot 21,3^2) \cdot \cos\theta = \\&= \underline{1,1732} \cdot \cos\theta \dots(\text{T/m})\end{aligned}$$

Sejsmiczne obciążenie powłoki zbiornika dachem pływającym jest równe

$$\begin{aligned}q_1(\theta) &= q_1(\max) \cos(\pi + 3\theta/2) = \\&= 2,4 \cdot P_d \cdot k_s \cdot 1/R \cdot \cos(\pi + 3\theta/2) = \\&= 2,4 \cdot 112,5 \cdot 1/40 \cdot 1/21,3 \cdot \cos(\pi + 3\theta/2) = \\&= \underline{0,3169} \cdot \cos(\pi + 3\theta/2) \dots(\text{T/m}), \quad -\pi/3 \leq \theta \leq +\pi/3\end{aligned}$$

Sejsmiczne obciążenie powłoki zbiornika napełnionego cieczą przy pionowym sejsmicznym wstrząsie wynosi

$$\begin{aligned}P_{v(\max)} &= 3 k_s P_{h(\max)} = 3 k_s \delta H = 3 \cdot 1/40 \cdot 0,92 \cdot 14,9 = \\&= \underline{1,0281} \dots(\text{T/m}^2)\end{aligned}$$

$$P_{h(\max)} = \delta H = 0,92 \cdot 14,9 = \underline{13,7080} \dots(\text{T/m}^2)$$

Całkowite sejsmiczne obciążenie cieczą działające na powłokę zbiornika jest równe

$$\begin{aligned}P_{\max} &= P_{h(\max)} + P_{v(\max)} = 13,7080 + 1,0281 = \\&= \underline{14,7361} \dots(\text{T/m}^2)\end{aligned}$$

Przyrost obciążenia na skutek działania sejsmicznego przy pionowym sejsmicznym wstrząsie wynosi:

$$\Delta P = \left[(14,7361 - 13,7080) / 13,7080 \right] \cdot 100 = \underline{7,5 \%}$$

Przyrost obciążenia na skutek wstrząsu sejsmicznego prowadzi w tym przykładzie do nieznacznego przekroczenia naprężeń dopuszczalnych. Wniosek jest tutaj analogiczny jak w przykładzie 3.1.

Literatura

- [1] SNiP II-A.12-69*, Stroitelnye normy i pravila, Normy proektirovaniya, Stritelstvo v seismicheskikh raionakh, Gosstroj SSSR, Moskva 1977.
 - [2] Newmark N. M., Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.Y. 1971.
 - [3] Goldenblat I. I., Nikolaenko N. A., Raschet konstrukcii na deistvie seismicheskikh i impulsivnykh sil, Gosstroizdat, Moskva 1961.
 - [4] Rekomendacii po raschetu rezervuarov i gazgolderov na seismicheskie vozdeistviya, Izd. literatury po stroitelstvu, Moskva 1969.
-