

## СЕЙЗМИЧНИ АНАЛИЗИ НА СТОМАНОБЕТОННИ ЦИЛИНДРИЧНИ РЕЗЕРВОАРИ

Станислав Цветков

[st.cvetkov@vsu.bg](mailto:st.cvetkov@vsu.bg)

*Висше строително училище „Любен Каравелов“ град София,  
катедра „Строителни конструкции“, улица „Суходолска“ № 175  
БЪЛГАРИЯ*

*Ключови думи:* хидродинамични товари, Еврокод 8, НПССЗР-2012, СНиП (Строителни Норми и Правила)

*Резюме:* Докладът показва, сеизмичен анализ според различни нормативни документи и стандарти за инженерно проектиране, на стоманобетонни цилиндрични резервоари за съхранение на вода. Анализите са свързани с въвеждането на хидродинамични натоварвания в специализиран инженерен програмен продукт. Използван софтуер е Tower 7, базиран на работата по Метода на крайните елементи.

*Показани са:* информация за резервоара, почвата, сеизмичното въздействие и хидродинамичните натоварвания от водата по време на земетръс.

*Представени са вътрешни усилия на стената (на съоръжението) и изводите-сравнения между резултатите от трите теории.*

*Докладът се придружава с: формули, схеми и използвана литература.*

### 1. Общи сведения

Данни за анализа: Изследва се съоръжение със следната геометрия: височина на стената-  $H_{\text{cyl}} = 6 \text{ m}$ , дебелина на стената-  $\delta_{\text{cyl}} = 25 \text{ cm}$ , височина на водното ниво- 5 m, диаметър на цилиндъра (водата)- 10 m. Материал за съоръжението: бетон клас C25/30. Почва тип D, референтно ускорение-  $a_{\text{gR}} = 0,23 \text{ g}$ , коефициент на поведение-  $q=1$ .

Извършени са спектрални анализи. Изследвана посока- x.

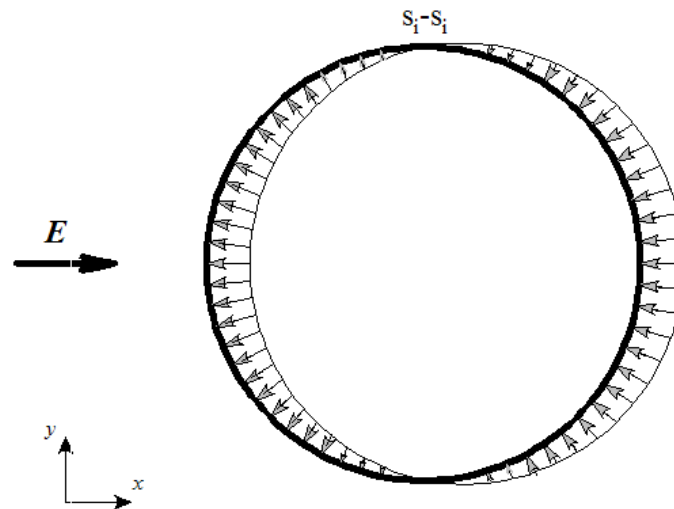
Използван програмен продукт- Tower 7 (базиран на работа по Метода на крайните елементи).

Проведените решения са с трансформирани товари.

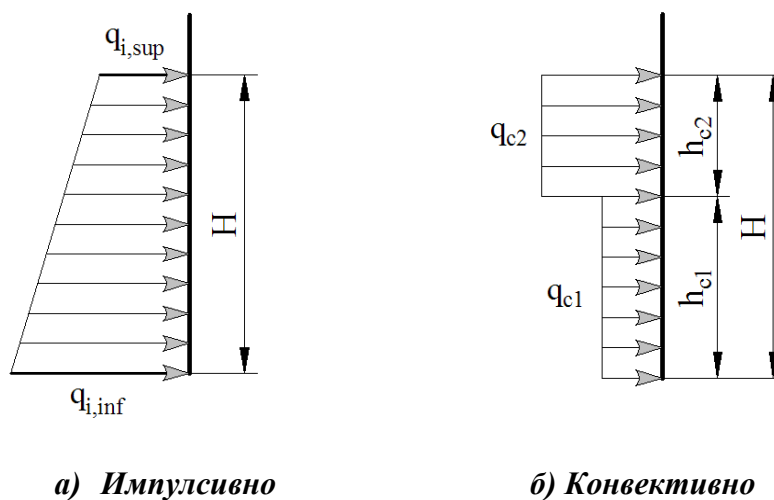
Гъвкавостта на стената на резервоара е отчетена при модалния анализ.

Хидростатичният натиск е включен в комбинация със сеизмичното въздействие (в т.ч. и хидродинамичните натоварвания).

**2. Въздействия и резултати**  
**2.1. Анализ, съгласно Еврокод 8- [1]**



**Фиг. 1 – Разпределение на наляганията в разрез**



**Фиг. 2 – Еквивалентни натоварвания**

$$m = \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot \rho_w = 3,14 \cdot 5^2 \cdot 5 \cdot 1000 = 392500 \text{ kg} = 3925 \text{ kN}$$

$$\gamma = \frac{H}{R} = \frac{5}{5} = 1 \rightarrow \begin{cases} \frac{m_i}{m} = 0,548 \\ \frac{h_i}{H} = 0,419 \\ \frac{m_c}{m} = 0,452 \\ \frac{h_c}{H} = 0,616 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_i = 0,548 \cdot m = 0,548 \cdot 3925 = 2150,90 \text{ kN} \\ h_i = 0,419 \cdot H = 0,419 \cdot 5 = 2,10 \text{ m} \\ m_c = 0,452 \cdot m = 0,452 \cdot 3925 = 1774,10 \text{ kN} \\ h_c = 0,616 \cdot H = 0,616 \cdot 5 = 3,08 \text{ m} \end{cases}$$

$$A_1(T=0s) = a_g \cdot S = 9,81 \cdot 0,23 \cdot 1 = 2,26 \text{ m/s}^2$$

$$q_i = \frac{\frac{A_i}{g} \cdot \frac{m_i}{2} \cdot g}{\pi \cdot \frac{D}{2}} = \frac{\left[ \frac{2,26 \cdot (2150,9 \cdot 100)}{9,81} \cdot \frac{9,81}{2} \right] : 1000}{3,14 \cdot \frac{10}{2}} = 15,48 \text{ kN/m}$$

$$2 \cdot h_i = 2 \cdot 2,10 = 4,20 \text{ m} < H = 5 \text{ m} \rightarrow$$

$$q_{i,\text{inf}} = \frac{q_i}{H^2} \cdot (4 \cdot H - 6 \cdot h_i) = \frac{15,48}{5^2} \cdot (4 \cdot 5 - 6 \cdot 2,10) = 4,58 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{i,\text{sup}} = \frac{q_i}{H^2} \cdot (6 \cdot h_i - 2 \cdot H) = \frac{15,48}{5^2} \cdot (6 \cdot 2,10 - 2 \cdot 5) = 1,61 \text{ kN/m}^2$$

$$\omega_c = \sqrt{g \cdot \frac{\lambda}{R} \cdot \tanh\left(\lambda \cdot \frac{H}{R}\right)} = \sqrt{9,81 \cdot \frac{1,841}{5} \cdot \tanh\left(1,841 \cdot \frac{5}{5}\right)} = 1,85 \text{ rad}$$

$$T_c = \frac{\omega_c}{2 \cdot \pi} = \frac{1,85}{2 \cdot 3,14} = 0,3 \text{ s}$$

$$A_c(T_c = 0,3 \text{ s}) = S_e = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 = 0,23 \cdot 9,81 \cdot 1,1 \cdot 41,2,5 = 7,95 \text{ m/s}^2$$

$$2 \cdot h_c = 2 \cdot 3,08 = 6,16 \text{ m} > H = 5 \text{ m} \Rightarrow \begin{cases} h_1^c = h_c = 3,08 \text{ m} \\ h_2^c = h - h_c = 5 - 3,08 = 1,92 \text{ m} \end{cases}$$

$$q_{c1} = \frac{\frac{A_c}{g} \cdot \left(\frac{m_c}{2}\right) \cdot g}{h_1^c \cdot \pi \cdot \frac{D}{2}} = \frac{\left[ \frac{7,95 \cdot (1774,10 \cdot 100)}{9,81} \cdot \frac{9,81}{2} \right] : 1000}{3,08 \cdot 3,14 \cdot \frac{10}{2}} = 7,29 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{c2} = \frac{\frac{A_c}{g} \cdot \left(\frac{m_c}{2}\right) \cdot g}{h_2^c \cdot \pi \cdot \frac{D}{2}} = \frac{\left[ \frac{7,95 \cdot (1774,10 \cdot 100)}{9,81} \cdot \frac{9,81}{2} \right] : 1000}{1,92 \cdot 3,14 \cdot \frac{10}{2}} = 11,70 \text{ kN/m}^2$$

## 2.2. Анализ, съгласно Наредба РД-02-20-2/01.2012 за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони- [2]

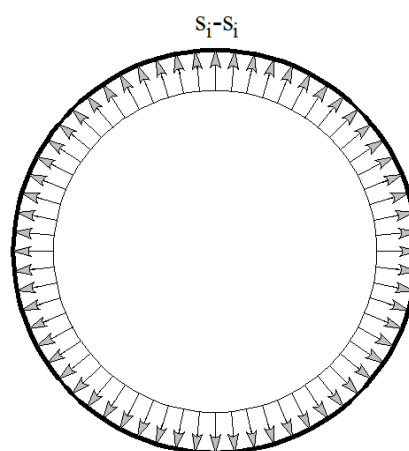
Таблица 1. Входни данни

$z$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{z}{h} = \frac{z}{5}$	$\frac{d_1}{2 \cdot h} = \frac{10}{2 \cdot 5}$	$\mu = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{d_1}{2 \cdot h}}$
0	0,785	0	1	0
0,5	0,785	0,1	1	0,0785
1	0,785	0,2	1	0,157
1,5	0,785	0,3	1	0,2355
2	0,785	0,4	1	0,314
2,5	0,785	0,5	1	0,3925
3	0,785	0,6	1	0,471
3,5	0,785	0,7	1	0,5495
4	0,785	0,8	1	0,628
4,5	0,785	0,9	1	0,7065
4,95	0,785	0,99	1	0,7772

$$p_1 = C.R.K_c \cdot \rho_w \cdot g \cdot d_1^2 \cdot D = 1.1 \cdot 0,23 \cdot 10 \cdot 9,81 \cdot 10^2 \cdot D = 2256,3 \cdot D$$

**Таблица 2. Хидродинамични налягания**

$z$	$D = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{d_1}{2 \cdot h}} \equiv \mu$	$p_1 = 2256,3 \cdot D$	$\frac{p_1}{\pi \cdot \frac{d_1}{2}}$
0	0	0	0
0,5	0,0785	177,12	11,28
1	0,157	354,24	22,56
1,5	0,2355	531,36	33,85
2	0,314	708,48	45,13
2,5	0,3925	885,60	56,41
3	0,471	1062,72	67,69
3,5	0,5495	1239,84	78,97
4	0,628	1416,96	90,25
4,5	0,7065	1594,08	101,53
4,95	0,7772	1753,60	111,69



**Фиг. 3 –**  
Хидродинамични налягания  
в сечение  $s_i-s_i$  през цилиндъра

Диаграмата на налягането (по височина) е линейна и се въвежда директно в програмния продукт като равномерно разпределен товар в сечения  $s_j-s_j$  на дълбочините  $z$ , съгласно Фиг. 3!

### 2.3. Анализ, съгласно СНИП (руски норми за проектиране)- [3]

$$P_x = g \cdot m_w \cdot A_{\max}^{(x)} \cdot k_5$$

$$m_w = \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot \rho_w = 3,14 \cdot 5^2 \cdot 5 \cdot 1 = 392,5 \text{ t}$$

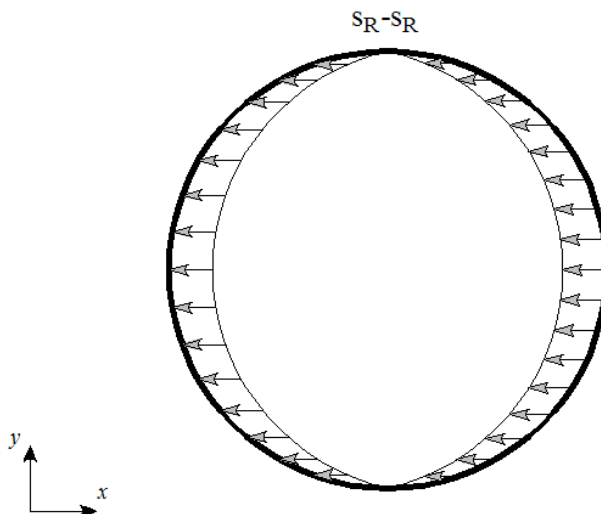
$$h_0 = \frac{h}{R} = \frac{5}{5} = 1 \rightarrow k_5 = 0,55$$

$$\Rightarrow P_x = 9,81 \cdot 392,5 \cdot 0,23 \cdot 0,55 \approx 490 \text{ t}$$

$$h_0 = 1 \rightarrow k_6 = 0,4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_{0c} (\equiv h_R) = k_6 \cdot h = 0,4 \cdot 5 = 2 \text{ m}$$

$$P_x^* = \frac{P_x}{\pi \cdot \frac{D}{2}} = \frac{4900}{3,14 \cdot \frac{10}{2}} = 312,1 \text{ kN / m'}$$



**Фиг. 4 – Сечение  $s_R - s_R$  през цилиндъра-**  
Хидродинамичното налягане  $P_x^*$ , приложено като  
резултантна на ниво  $h_R$

### 3. Резултати и изводи

Наблюдава се голямо различие в получените усилия за стената.

За „база“ е прието решението, съгласно ЕС-8 –[1], като: разликата между решенията с [1] и НПСЗР-2012- [2], при сравнявано усилието в пръстенно направление е  $\Delta = 74,8\%$ , а разликата между решенията с [1] и СНИП- [3], при сравнявано усилието в пръстенно направление е  $\Delta = 78,66\%$ .



Фиг. 5 – \*Извадка- разлики при резултатите за максималните разрезни усилия

Таблица 3. Обобщени резултати

Разрезно усилие	NPCC3P-2012	СНиП	EC-8
$(+)M_x$ , [kN.m / m']	+6,27 x- посока, при запъването, едно срещу друго	+7,79 x- посока, при запъването, <i>едностранно- в началото на к. с-ма</i>	+5,41 y- посока, h=4 m, едно срещу друго
$(+)M_y$ , [kN.m / m']	+82,50 x- посока, при запъването, едно срещу друго	+64,93 x- посока, h=2 m, <i>срещу началото на к.с-ма</i>	+26,50 y- посока, при запъването, едно срещу друго
$(+)N_x$ , [kN / m']	+857,46 x- посока, h=2 m, едно срещу друго	+1012,91 x- посока, h=2 m, <i>едностранно- в началото на к. с-ма</i>	+216,12 x- посока, h=2 m, <i>от двете страни на началото на к. с-ма</i>
$(+)N_y$ , [kN / m']	+14,53 x- посока, h=1,5 m, едно срещу друго	+241,40 x- посока, при запъването, <i>едностранно срещу началото на к. с-ма</i>	+61,66 x- посока, при запъването, <i>от двете страни срещу началото на к. с-ма</i>
$(-)M_x$ , [kN.m / m']	-3,46 x- посока, h=1,5 m, едно срещу друго	-7,22 x- посока, h=2 m, <i>едностранно- в началото на к. с-ма</i>	-5,07 y- посока, h=4,5 m, едно срещу друго
$(-)M_y$ , [kN.m / m']	-21,21 x- посока, h=1,5 m, едно срещу друго	-69,48 x- посока, h=2 m, <i>едностранно- в началото на к. с-ма</i>	-5,14 y- посока, h=1,5 m, едно срещу друго
$(-)N_x$ , [kN / m']	-95,85 x- посока, горен край, едно срещу друго	-704,80 x- посока, h=2 m, <i>едностранно- срещу началото на к. с-ма</i>	-41,46 x- посока, горен край, <i>едностранно- в началото на к. с-ма</i>
$(-)N_y$ , [kN / m']	-115,16 x- посока, при запъването, едно срещу друго	-339,85 x- посока, при запъването, <i>едностранно- в началото на к. с-ма</i>	-160,10 y- посока, при запъването, едно срещу друго

**Литература:**

- [1] Еврокод 8- Проектиране на силози, резервоари, тръбопроводи, Сборник 9, БИС, С., 2010
- [2] Наредба РД-02-20-2/01.2012г. за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони, МРРБ, С., 2012
- [3] СНиП II-7-81\*, Строительство в сейсмических районах/ Минстрой России. М.: ГП ЦПП, 1995

**SEISMIC ANALYSIS OF R. C. CYLINDRIC TANKS FOR WATER STORAGE**

**Stanislav Tsvetkov**

[st.cvetkov@vsu.bg](mailto:st.cvetkov@vsu.bg)

*University of structural engineering & architecture (VSU) “Lyuben Karavelov”,  
Department “Building construction”  
Sofia, 175 Suhodolska, str.  
BULGARIA*

**Key words:** *hydrodynamic loads, Eurocode 8, НИССЗР-2012, СHuII*

**Abstract:** *The report shows seismic analysis according to different regulations for engineering design, of R.C. cylindrical tanks for water storage. Analyses are associated with commissioning in software of hydrodynamic loads. Used software is Tower 7, based on work by FEM.*

*Shown are: information about the tank, the soil, seismic effects, hydrodynamic loads from the water in time on earthquake.*

*Presented are internal efforts of the wall (of the facility) and conclusions - comparison between the results of the three theories.*

*The report is accompanied by: formulas, charts and references.*