

## ВЛИЯНИЕ НА КОЛОНИТЕ НА НЕСАМОНОСЕЩИТЕ КОНИЧНИ ПОКРИВИ ВЪРХУ СОБСТВЕНИТЕ ЧЕСТОТИ НА СЪХРАНЯВАНАТА ТЕЧНОСТ

Л. Здравков<sup>1</sup>

*Ключови думи: съхранявана течност, вътрешни колони, собствени честоти*

### РЕЗЮМЕ

По време на сеизмично въздействие съхраняваната в резервоарите течност няма поведението на твърдо тяло. Условно тя може да бъде разделена на две компоненти – пасивна (импулсивна) и активна (конвективна). Стандартите за проектиране на стоманени резервоари имат различен подход при определяне на собствената честота на активната съставляваща на течността. Общото за всички тях е, че при нейното изчисляване се отчита само отношението ниво на запълване – радиус на корпуса. Не се взема предвид възможното наличие на елементи вътре в резервоарите, възпрепятстващи свободното движение на течността. Същевременно немалка част от стоманените резервоари имат несамоносещ коничен покрив, подпрян с вътрешни колони. Контактвайки с течността, колоните неизбежно ще окажат влияние върху собствените честоти на активната съставляваща. Въпросът е дали изменението ще бъде голямо или не? Ще можем ли да ползваме описаните в стандартите процедури и при резервоари с колони в течността?

### 1. Въведение

По време на сеизмично въздействие съхраняваната в резервоарите течност няма поведението на твърдо тяло. Тя условно може да бъде разделена на две компоненти:

- пасивна (импулсивна) съставляваща – част от течността близо до дъното се движи заедно с резервоара, сякаш е твърдо тяло. Собствените ѝ честоти на трептене съвпадат със собствените честоти на стоманения резервоар;

- активна (конвективна) съставляваща – част от течността близо до повърхността се движи свободно и предизвиква образуване на вълни. Тази част от течността трепти със собствени честоти, които са различни от собствените честоти на резервоара. Най-значима от тях е първата форма на трептене.

Стандартите за проектиране на стоманени резервоари имат различен подход при определяне на собствената честота / периода  $T_{conv}$  на активната (конвективната) съставляваща на течността, в първа форма, например:

а) според БДС EN1998-4 [1]

$$T_{conv} = C_c \cdot \sqrt{r}, \quad (1)$$

където  $T_{conv}$  е периодът на активната компонента на течността в първа форма;

$C_c$  е коефициент, отчетен от табл. 1;

---

<sup>1</sup> Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, УАСГ, корпус „Б“, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: zdravkov\_fce@uacg.bg

$r = D / 2$  - радиусът на корпуса на резервоара;  
 $D$  - диаметърът на резервоара.

Таблица 1. Коефициенти  $C_i$ ,  $C_c$ ,  $m_i$ ,  $m_c$ ,  $h_i$ ,  $h_c$ ,  $h_i'$ ,  $h_c'$

$H_t / r$	$C_i$	$C_c$ , ( $s/m^{0.5}$ )	$m_i / m$	$m_c / m$	$h_i / H_t$	$h_c / H_t$	$h_i' / H_t$	$h_c' / H_t$
0,3	9,28	2,09	0,176	0,824	0,400	0,521	2,640	3,414
0,5	7,74	1,74	0,300	0,700	0,400	0,543	1,460	1,517
0,7	6,97	1,60	0,414	0,586	0,401	0,571	1,009	1,011
1,0	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,785
1,5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,690	0,555	0,734
2,0	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,500	0,764
2,5	6,56	1,48	0,810	0,190	0,452	0,794	0,480	0,796
3,0	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

в която  $H_t$  е разстоянието от дъното до свободната повърхност на течността при максимално ниво на запълване на резервоара.

б) според API 650, 12<sup>th</sup> Edition [5]

$$T_{conv} = 1,81 \cdot k_s \cdot \sqrt{D}, \quad (2)$$

където  $k_s$  е коефициент, който може да се определи чрез израза:

$$k_s = \frac{0,578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3,68 \cdot H_t}{D}\right)}} \quad (3)$$

Във формули (2) и (3) диаметърът на резервоара  $D$  и максималното ниво на запълване на резервоара с течност  $H_t$  трябва да са в [m].

Уравнение (2) е получено след известно преобразуване и опростяване на известната формула на *Haroun* [7]:

$$T_{conv} = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1,84g}{r} \tanh\left(\frac{1,84H_t}{r}\right)}}, \quad (4)$$

където  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  е приетата стойност на земното ускорение.

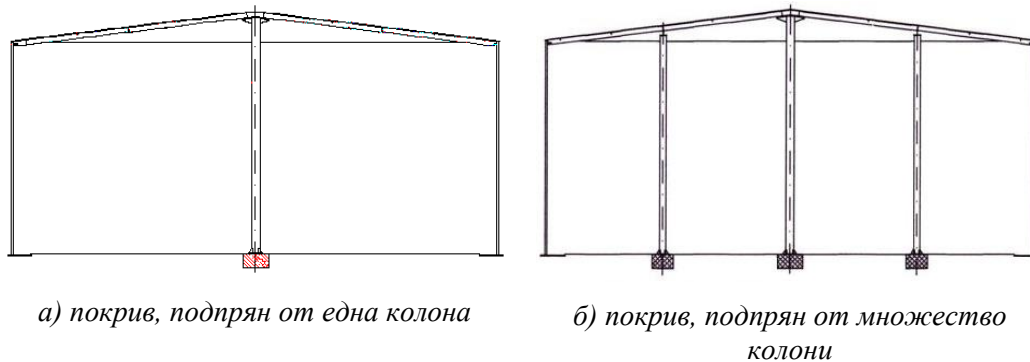
в) според EN14015:2004 [6]

Апнех G, в който са посочени препоръките за сеизмично осигуряване на стоманените резервоари, са преписани от по-стари версии на американския стандарт API650. Формулата за определяне на  $T_{conv}$  е идентична на (2).

Знаейки стойността на периода  $T_{conv}$ , определена по формули 1 – 4, лесно можем да определим честотата  $f$  на трептне на течността чрез израза:

$$f = \frac{1}{T_{\text{conv}}} \quad (5)$$

Общото за всички стандарти и формули по горе е, че при определяне на собствената честота на активната (конвективната) компонента  $T_{\text{conv}}$  се отчита само отношението  $H_t / r$ . Не се взема предвид възможното наличие на елементи вътре в резервоарите, възпрепятстващи свободното движение на съхраняваната течност. Същевременно немалка част от стоманените резервоари имат несамоносещ коничен покрив, подпрян с вътрешни колони. При резервоари с малки диаметри колоната е само една, разположена в центъра, виж фиг. 1а. При съоръжения с големи диаметри колоните са няколко и са поставени в концентрични кръгове, виж фиг. 1б.



**Фиг. 1. Несамоносещи конични покриви**

Наличието на колони в течността неизбежно ще окаже влияние върху собствените честоти на активната (конвективната) съставляваща. Въпросът е дали изменението ще бъде голямо или не? Ще можем ли да ползваме описаните по-горе формули (1-4) и при резервоари с колони в тях или ще трябва да търсим други зависимости? В настоящата статия авторът ще се опита да намери отговор на тези въпроси.

## 2. Моделиране

Чрез графичния интерфейс Workbench на ANSYS [4] са създадени няколко пространствени модела на стоманени вертикални цилиндрични резервоари с коничен покрив. Техните обем  $V$ , вътрешен диаметър  $D$ , височина на корпуса  $H_s$ , максимална височина на запълване  $H_t$ , брой и дебелини на поясите са съгласно Типова работна документация на стоманени вертикални резервоари [3], виж табл. 2:

**Таблица 2. Размери на моделираните резервоари**

Резервоар	Обем $V, \text{m}^3$	Диаметър $D, \text{m}$	Височина $H_s, \text{m}$	Запълване $H_t, \text{m}$	Брой пояси	Дебелини, mm	Покрив
1	1 000	12,33	8,94	8,2	6x1490	4	коничен
2	2 000	15,18	11,92	11,2	8x1490	6,5,5,4 ÷ 4	коничен
3	3 000	18,98	11,92	11,2	8x1490	7,6 ÷ 6	коничен
4	5 000	22,8	11,92	11,2	8x1490	9,8,7,6 ÷ 6	коничен

Резервоарите са изследвани в три варианта:

- а) при самоносещ коничен покрив, т.е. без вътрешна колона, виж фиг. 2а;
- б) при наличие на една вътрешна колона, разположена в центъра на резервоара;
- в) при наличие на пет вътрешни колони – една е разположена в центъра, а останалите четири – в кръг около нея, виж фиг. 2в.

Колоните са със сечение  $\text{Ø}426 \times 10$  mm. Всички те са запънати към основата.

При резервоара с една централна колона, виж фиг. 2б, в основата на колоната има стоманено цилиндрично тяло с диаметър  $\text{Ø}2\ 660$  mm и височина 1 000 mm [3]. То е запълнено с бетон и неговото предназначение е:

- разпределя вертикалните товари от покрива върху по-голяма повърхност на земната основа;
- не позволява повдигането на покрива от свръхналягане в резервоара и/или “смучене” от вятър.

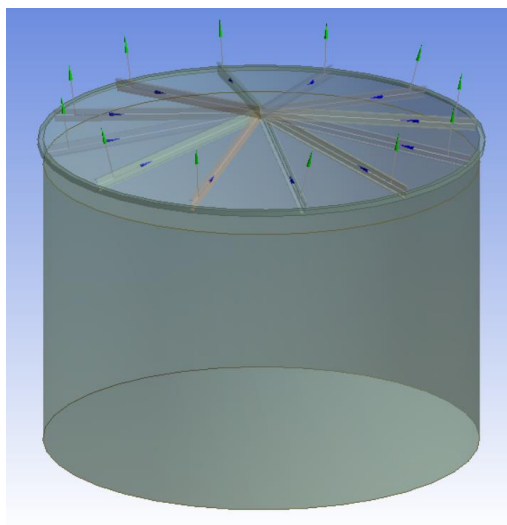
Характеристиките на използваните в изследването материали са както следва:

а) стомана:

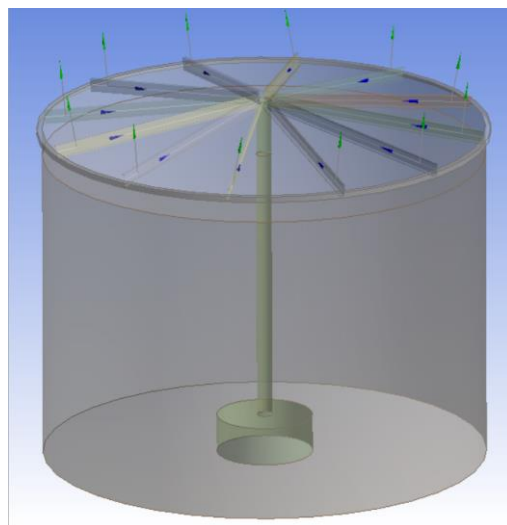
- модул на еластичността –  $E = 200\ 000$  МПа;
- коефициент на *Poisson* –  $\nu = 0,3$ ;
- плътност –  $\rho_s = 7\ 850$  kg/m<sup>3</sup>.

б) вода:

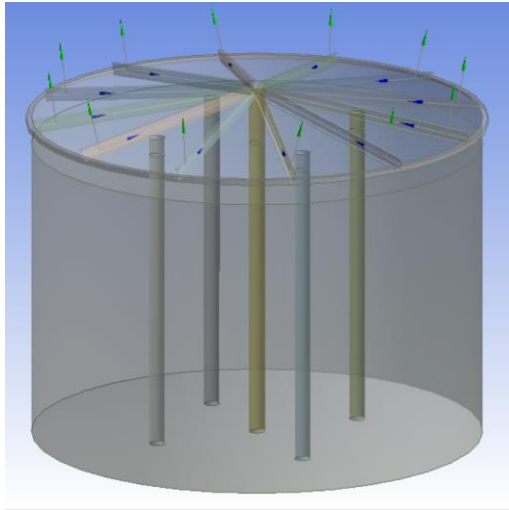
- скорост на звука във вода –  $v_w = 1\ 482,1$  m/s;
- плътност –  $\rho_w = 998$  kg/m<sup>3</sup>;
- вискозитет – не е отчитан.



а) самоносещ коничен покрив



б) коничен покрив с една колона



**Фиг. 2. Варианти на изследваните стоманени резервоари**

*в) коничен покрив с пет колони*

Особеностите при създаване на числените модели са, както следва:

а) използваният модул в ANSYS Workbench за определяне на собствените честоти на течността е Modal Acoustics. В предишно изследване на автора [2] беше доказано, че този модул е единственият, който дава достоверни резултати без да е необходимо да се въвеждат допълнителни текстови команди;

б) стоманеното тяло на резервоара е симулирано чрез черупкови (shell) елементи;

в) тялото на водата е създадено чрез използване на течностни (fluid) елементи;

г) Workbench автоматично създава връзка между двата материала, която може да бъде с различни свойства. В настоящото изследване е прието, че двата материала ще могат свободно да се плъзгат един спрямо друг, но без да се разделят (No separation). Взаимното проникване на двата материала е ограничено до 0,01 mm ;

д) максималният размер на краен елемент от мрежата е ограничен до 500 mm;

е) използваните крайни елементи имат възли само в крайните ръбове, т.е. средните възли са деактивирани;

ж) резервоарът е запънат към земната основа;

з) в горния ръб на корпусите на резервоарите е поставен ъглов профил, заварен на „перо“, имащ сечение 150x150 mm и дебелина, равна на дебелината на последния пояс;

и) покривната конструкция е симулирана чрез множество радиално поставени прътови (frame) елементи, имащи сечение съгласно Типовата документация на СВР [3]:

- резервоар с обем  $V = 1\,000\text{ m}^3$  – 12 бр. греди от U36 по БДС 6176-75;

- резервоар с обем  $V = 2\,000\text{ m}^3$  – 14 бр. греди от I45 по БДС 5951-75;

- резервоар с обем  $V = 3\,000\text{ m}^3$  – 18 бр. греди от I45 по БДС 5951-75;

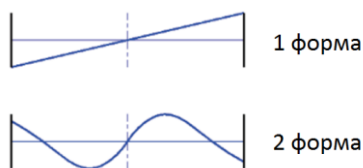
- резервоар с обем  $V = 5\,000\text{ m}^3$  – 24 бр. греди от I50 по БДС 5951-75;

й) земното ускорение  $g = 9,8066\text{ m/s}^2$ ;

к) ефектите от демпфиране на течността и на резервоара не се отчитат.

### 3. Резултати

И при трите варианта на покривната конструкция са отчитани първите две форми на трептене на свободната повърхнина на течността. Теоретично, те имат показания на фиг. 3 вид:



**Фиг. 3. Теоретична форма на свободната повърхност на течността за първите две собствени форми на разплискване**

За проверка на коректността на численото моделиране, собствените честоти за разглежданите резервоари без вътрешни колони са изчислени и съгласно указанията на други утвърдени учени в разглежданата област, като:

а) *Lamb*

Първите две собствени честоти се определят чрез израза [9]:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\alpha_i \frac{g}{r} \tanh\left(\alpha_i \frac{H_t}{r}\right)}, \quad (6)$$

където  $\alpha_i$  е коефициент, имащ следните стойности:

=  $0,586 \pi$  – за първа форма;

=  $1,697 \pi$  – за втора форма;

б) *Housner*

Според него периодът на първата собствена форма на вълнообразуване се изчислява по формулата [8]:

$$T_{\text{conv}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_1}{k_1}}, \quad (7)$$

където:

$$M_1 = 0,6M \frac{r}{1,8H_t} \tanh\left(\frac{1,8H_t}{r}\right) \quad (8)$$

$$k_1 = 5,4 \frac{M_1^2}{M} \frac{g \cdot H_t}{r^2}, \quad (9)$$

в които:

$$M = V \cdot \rho, \quad (10)$$

където  $V$  е обемът на съхраняваната течност,  $\text{m}^3$ ;

$\rho$  – плътността на течността,  $\text{t/m}^3$ .

в) *Haroun*

Периодът на първата собствена форма на вълнообразуване се изчислява по (4).

Тук авторът още веднъж ще обърне внимание, че стандартите API 650 и EN14015:2004 използват модифицираната версия на формула (4).

Стойностите на получените стойности на собствените честоти на вълнообразуване са показани в табл. 3-6.

**Таблица 3. Собствени честоти на свободната повърхност на течността при резервоар с обем  $V = 1\ 000\ m^3$ , Hz**

Форма	ANSYS			EN1998-4	<i>Lamb</i>	<i>Housner</i>	<i>Haroun</i>
	без колони	с 1 колон а	с 5 колони	без вътрешни колони			
1	0,2706	0,2704	0,2695	0,27	0,2703	0,2671	0,2702
2	0,4655	0,4683	0,4641	–	0,4635	–	–

**Таблица 4. Собствени честоти на свободната повърхност на течността при резервоар с обем  $V = 2\ 000\ m^3$ , Hz**

Форма	ANSYS			EN1998-4	<i>Lamb</i>	<i>Housner</i>	<i>Haroun</i>
	без колони	с 1 колон а	с 5 колони	без вътрешни колони			
1	0,2446	0,2448	0,2441	0,245	0,2444	0,2415	0,2443
2	0,4193	0,4226	0,4186	–	0,4177	–	–

**Таблица 5. Собствени честоти на свободната повърхност на течността при резервоар с обем  $V = 3\ 000\ m^3$ , Hz**

Форма	ANSYS			EN1998-4	<i>Lamb</i>	<i>Housner</i>	<i>Haroun</i>
	без колони	с 1 колон а	с 5 колони	без вътрешни колони			
1	0,2168	0,2167	0,2165	0,215	0,2132	0,214	0,2166
2	0,3744	0,3754	0,3737	–	0,3675	–	–

**Таблица 6. Собствени честоти на свободната повърхност на течността при резервоар с обем  $V = 5\,000\text{ m}^3$ , Hz**

Форма	ANSYS			EN1998-4	<i>Lamb</i>	<i>Housner</i>	<i>Haroun</i>
	без колони	с 1 колони	с 5 колони	без вътрешни колони			
1	0,1950	0,1949	0,1948	0,1942	0,195	0,1924	0,1949
2	0,3414	0,3415	0,3411	–	0,3408	–	–

#### 4. Изводи

Получените чрез модула Modal Acoustics на ANSYS Workbench стойности на собствените честоти на свободната повърхност на течността са много близки до теоретично определените. Отчетените разлики с предложените аналитични решения на *Lamb*, *Housner* и *Haroun* не превишават 2%.

Констатираните разлики между собствените честоти на течността при резервоари без вътрешни колони и такива със, са много малки, под 1%. Откъдето следва, че при резервоари с несамоносещи покриви с малка грешка може да се използват аналитичните методи за цилиндрични тела без колони в тях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1998-4:2006, Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 4: Силози, резервоари и тръбопроводи. БИС, юни, 2009.
2. Пантушева, М., Здравков, Л. Изследване на стоманени вертикални резервоари чрез ANSYS Workbench и ANSYS Mechanical APDL. // Годишник на УАСГ, 2019, том 52, брой 3, стр. 851-865.
3. Типова работна документация на СВР с обем от 100 до 10 000 m<sup>3</sup>, изградени по рулонен метод. МССМ, 1977.
4. ANSYS® v.19 Documentation. Ansys Inc., Canonsburg, PA, the USA.
5. API Std 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition, Addendum 3. American Petroleum Institute, Washington. August 2018.
6. EN 14015:2004, Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above. CEN, November 2004.
7. Haroun, M. A. Vibration studies and test of liquid storage tanks. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 11, pp. 179–206, 1983.
8. Housner, G. W. The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of Seismological Society of America, 53, 1963.
9. Lamb, H. Hydrodynamics. Cambridge University Press, 1932.