

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Първа научно-приложна конференция с международно участие
„СТОМАНОБЕТОННИ И ЗИДАНИ КОНСТРУКЦИИ – ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА“

22 – 23 октомври 2015

22 – 23 October 2015

First Scientific-Applied Conference with International Participation

“REINFORCED CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES – THEORY AND PRACTICE”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

48 ^{ТОМ}
vol.

2015

св.
fasc. 12 – II

ХИДРОДИНАМИЧНО НАТОВАРВАНЕ ПРИ СТОМАНОБЕТОННО СЪОРЪЖЕНИЕ

Р. Орлинов¹, Ат. Николов²

Ключови думи: хидродинамично натоварване, земетръс, активно и пасивно налягане, стоманобетонен резервоар

Научна област: сеизмично осигуряване

РЕЗЮМЕ

Авторите представят специфични особености при оразмеряването на система стоманобетонни резервоари съгласно системата Еврокодове. Разглежда се проект за незасипано пречиствателно съоръжение в гр. Луковит, състоящо се от цилиндричен стоманобетонен резервоар, вписан в правоъгълен резервоар. Анализира се активното и пасивното водно натоварване при сеизмично въздействие. Въздействията са моделирани и комбинирани в изчислителен модел по метода на крайните елементи.

1. Теоретична обосновка за хидродинамично водно налягане

Определянето на хидродинамичното натоварване е извършено съгласно [5]. По време на земетръс течността няма поведение на твърдо тяло. Условно натоварването от флуид за цилиндричен резервоар, върху земна основа може да се раздели на две компонента – пасивно налягане и активно налягане.

Пасивно налягане (impulsive pressure) – това е частта от флуида, която е по-близко до дъното на резервоара. При земетръс се приема, че масата на пасивната

¹ Радослав Орлинов, ас. инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: orlinov_fce@uacg.bg

² Атанас Николов, доц. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: at_nikolov@abv.bg

компонента се движи заедно с конструкцията. Според [5] пасивната компонента p_i се определя от следните изрази:

$$p_i(\xi, \zeta, \theta) = C_i(\xi, \zeta) \cdot \rho \cdot H \cdot \cos[\theta] A_g; \quad (1)$$

$$C_i(\xi, \zeta) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n}{I_1' \left(\frac{v_n}{\gamma} \right) v_n^2} \cos(v_n \zeta) I_1 \left(\frac{v_n}{\gamma} \xi \right) \right), \quad (2)$$

където: $v_n = \frac{2n+1}{2} \pi$; $\gamma = \frac{H}{R}$; $\zeta = \frac{z}{H}$; $\xi = \frac{r}{R}$;

H – височината на флуида в резервоара;

R – радиусът на резервоара;

z – търсеното ниво по височина в цилиндричната координатна система;

r – търсеният радиус в цилиндричната координатна система;

ρ – плътността на флуида;

θ – ъгълът на сеизмичното въздействие ($\theta = 0$ е в посока на E);

A_g , ако се използва спектрален анализ съвпада със спектралното ускорение S_a

за $T = 0$ s;

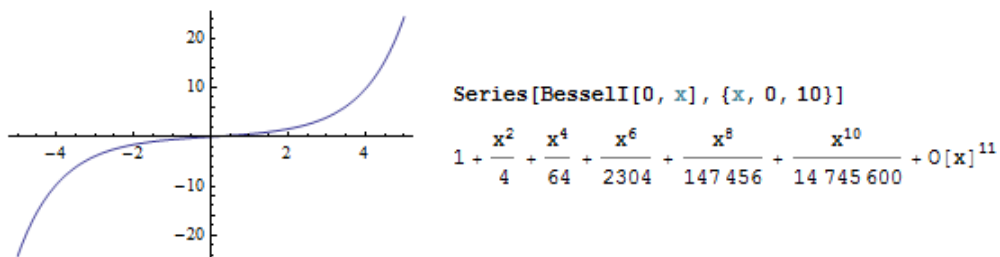
$I_1(*)$; $I_1'(*)$ – модифицирана I функция на Бесел от първи ред (представява ред от прогресия) и нейната първа производна (фиг. 1);

$m = \rho \pi R^2 H$ – сумарната маса на флуида;

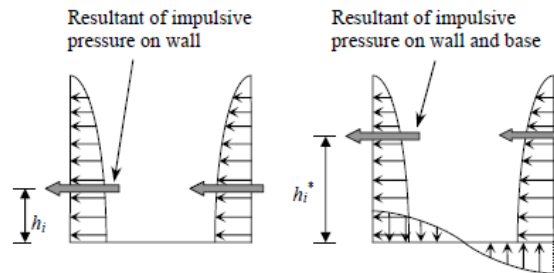
$$m_i = 2m\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_1 \left(\frac{v_n}{\gamma} \right)}{I_1' \left(\frac{v_n}{\gamma} \right) v_n^3} - \text{пасивната флуидна маса (impulsive mass);}$$

h_i – височина на равнодействащата на пасивното налягане, без да се отчита на товарването от флуид върху основата (фиг. 2);

h_i' – височина на равнодействаща на пасивното налягане на стените и основата.



Фиг. 1. Графика и уравнение на функцията на Бесел от първи ред



Фиг. 2. Схема на височината на равнодействаща на пасивното налягане [7]

Активно налягане (convective pressure) – това е частта от флуида, която е близко до повърхността на резервоара [8]. При земетръс се приема, че масата на активния компонент трепти независимо от конструкцията, главно от появата на вълни. Според [5] се определя:

$$p_c(\xi, \varsigma, \theta, t) = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cosh(\lambda_n \gamma \varsigma) J_1(\lambda_n \xi) \cos \theta A_{\text{сн}}(t); \quad (3)$$

$$\psi_n = \frac{2R}{(\lambda_n^2 - 1) J_1(\lambda_n) \cosh(\lambda_n \gamma)}, \quad (4)$$

където $J_1(*)$ – модифицирана J функция на Бесел от първи ред (представлява ред от прогресия);

$\lambda_1 = 1.841$ – за проектиране е от значение само първата форма на трептене;

$A_{\text{сн}}(t)$ – спектралното ускорение на система с една степен на свобода с честота $\omega_{\text{сн}}$;

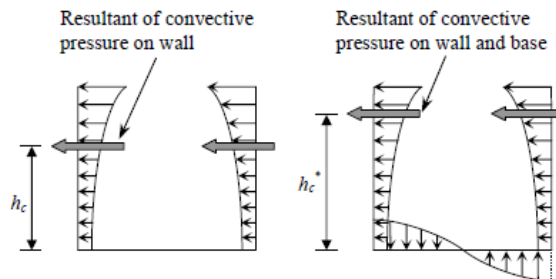
$$m_{\text{сн}} = m \frac{2 \tanh(\lambda_n \gamma)}{\gamma \lambda_n (\lambda_n^2 - 1)} - \text{активната флуидна маса (convective mass);}$$

$$h'_{\text{сн}} = H \left(1 + \frac{2 - \cosh(\lambda_n \gamma)}{\lambda_n \gamma \sinh(\lambda_n \gamma)} \right) - \text{височината на равнодействаща на пасивното}$$

налягане на стените и основата (фиг. 3);

$$h_{\text{сн}} = H \left(1 + \frac{1 - \cosh(\lambda_n \gamma)}{\lambda_n \gamma \sinh(\lambda_n \gamma)} \right) - \text{височината на равнодействаща на пасивното}$$

налягане, без да се отчита натоварването от флуид върху основата (фиг. 3).



Фиг. 3. Схема на височината на равнодействащата на активното налягане [7]

Активният компонент на натоварването от флуид може да се представи като осцилатор с маса m_{cn} , прикачена към резервоара с пружина с коравина $K_n = \omega_{cn} m_{cn}$ на височина h_{cn} и h'_{cn} . Резервоарът е подложен на ускорение $A_g(t)$ и активната маса на флуида ще има ускорение $A_{cn}(t)$.

Височината на вълната, предизвикана от сеизмичното въздействие, е $d_{max} = 0,84RS_e(T_{c1})/g$, където $S_e(T_{c1})$ е спектралното ускорение от първа форма на активната маса със затихване 0.5%.

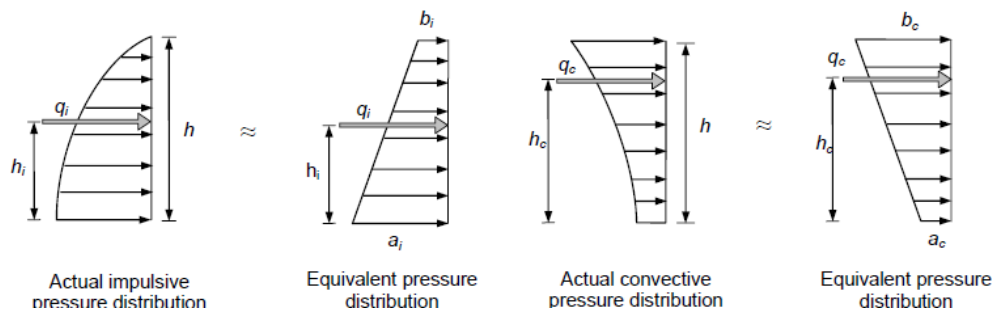
При стоманобетонни резервоари инерционните сили от стените трябва да се отчетат в анализа. Коефициентът на поведение е $q = 1.5$ за пасивното налягане при стените на резервоара и $q = 1.0$ за активния компонент [5].

Първи период на активната маса на флуида е:

$$T_1 = 2\pi \left(\frac{L/g}{\frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{\pi H}{2L}\right)} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

където L е половината от дължината на резервоара по посока на сеизмичното въздействие. За проектиране е допустимо да се ползват формулите за активно и пасивно водно налягане за цилиндричен резервоар, където $R = L$ [5].

За целите на проектирането параболичните функции на налягането по височина е удобно да се представят в линеен вид [6] чрез интензитета в основата и височината на равнодействаща им (фиг. 4).



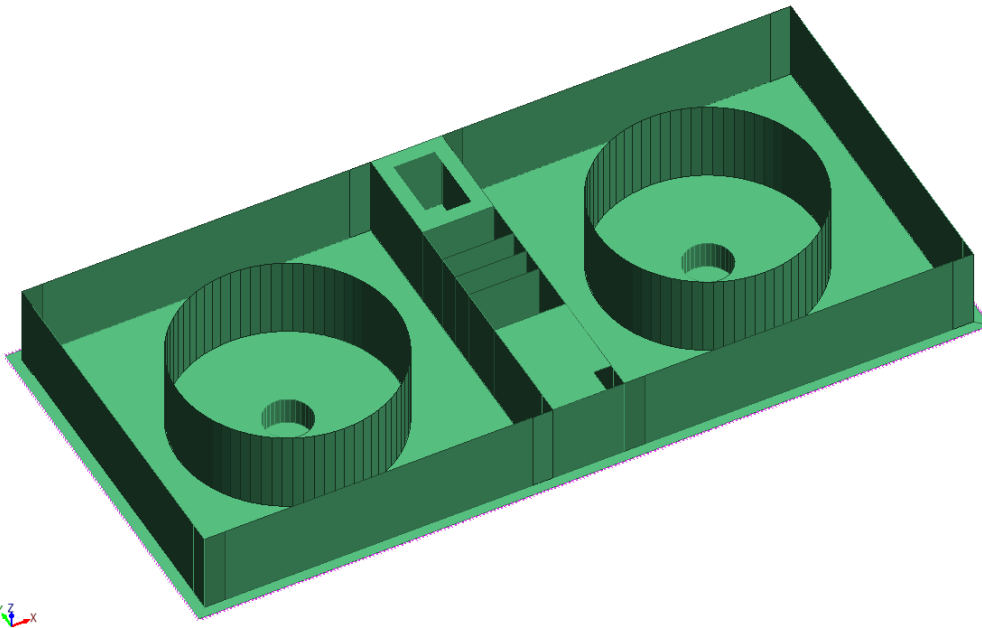
Фиг. 4. Схема на преобразуване на параболичните функции в трапецовидни [6]

Където $a_{i,c} = \frac{q_{i,c}}{H^2}(4H - 6h_i)$, $b_{i,c} = \frac{q_{i,c}}{H^2}(-2H + 6h_i)$ са зависимостите за определяне.

2. Особености на разглежданото съоръжение

Разглежданото съоръжение се състои от два цилиндрични резервоара, вписани в два резервоара с квадратно сечение. Конструкцията се проектира над нивото на терена и има максимално засипване от 1,20 m. Конструкцията се намира в гр. Луковит. Отчетено е референтно земно ускорение $a_{gr} = 0.13g$. Класът по значимост е втори, с

$\gamma_I = 1.0$. Гр. Луковит попада в района на въздействие на огнище Вранча, представено от спектър тип 3. Разработен е пространствен изчислителен модел. Конструкцията е моделирана с равнинни крайни елементи (Shell elements) със съответна дебелина (фиг. 5). Моделът е пригоден за линеен еластичен анализ. За получаване на съвместима мрежа са ползвани триъгълни и четириъгълни крайни елементи.



Фиг. 5. Схема на изчислителния модел на водното съоръжение

Съгласно [4] взаимодействието със земната основа трябва да се отчете в изчислителния модел. Земната основа е моделирана чрез еластична площна опора с пружинна константа по съответните глобални направления.

Отчетено е натоварването на съоръжението, включващо собствено тегло, земен натиск, експлоатационно натоварване, хидростатичен воден натиск и хидродинамично водно налягане.

3. Хидродинамично налягане на цилиндричния резервоар

Съответните размери на резервоара са: $H = 4.9$; $R = 7.5$. Преди да се пристъпи към изчисление, е необходимо да се калибрира модифицираната функция на Бессел. Съгласно [5] натоварването е представено като безкраен ред и е необходимо да се определи до колко члена ще се изчислява разглежданата функция ($n = ?$). Изчисленията са извършени със специализиран математически софтуер. С достатъчна точност може да се приеме ред от $n = 10$ члена.

3.1. Определяне на пасивния компонент (impulsive)

$$C_i(r = 7.5, z = 0) = 0.8177 ; \quad (6)$$

$$A_g = S_d(T=0) = a_g S \left(\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right) = 1.02 \text{ m/s}^2; \quad (7)$$

$$p_i(r=7.5, z=0) = C_i * \rho * H * \text{Cos}[\theta] A_g = 4.09 \text{ kN/m}^2. \quad (8)$$

Височината на пасивната водна маса е $h_i = 1.96 \text{ m}$. Стойностите на налягането на $z = 0 \text{ m}$ и $z = 4.9 \text{ m}$ за $\theta = 0$ са:

$$a_i = \frac{q^1}{H^2} (4H - 6h_i) = 4.82878 \text{ kN/m}^2; \quad b_i = \frac{q^1}{H^2} (-2H + 6h_i) = 1.20256 \text{ kN/m}^2. \quad (9)$$

За всеки от крайните елементи за стената на цилиндричния резервоар е необходимо да се получат стойности на налягането за $z = 0 \text{ m}$ и $z = 4.9 \text{ m}$. Стените са 72 броя, следователно стъпката на $\theta = 5^\circ$.

3.2. Определяне на активен компонент (convective)

Кръговата честота на активната водна маса и периодът на трептене са:

$$\omega_{\text{сп}} = \sqrt{g \frac{\lambda}{R} \tanh(\lambda * \gamma)} = 1.41757 \text{ rad}; \quad T = \frac{\omega_{\text{сп}}}{2\pi} = 0.225613 \text{ s}. \quad (10)$$

При период $T = 0.22 \text{ s}$ е без значение кой от двата типа спектри ще се ползва, тъй като в този интервал пиковите им стойности са еднакви. Коефициентът на затихване за 0.5% е $\eta = 1.35$. Спектралното ускорение за съответния период е

$$A_{\text{сн}}(T) = S_d(T) = 2.5 a_g g S \eta = 5.16 \text{ m/s}^2. \quad (11)$$

Изчисляват се стойностите на активното водно налягане по височината на резервоара и се определя тяхната равнодействаща: $p_c = 109.054 \text{ kN/m}^2$. Височината на равнодействащата спрямо дъното на резервоара е

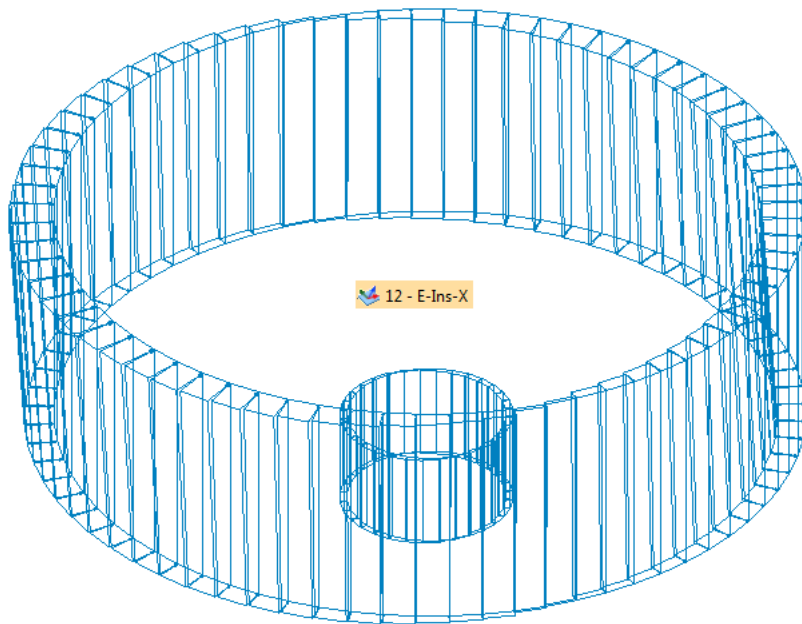
$$h_{\text{сн}} = H \left(1 + \frac{1 - \cosh[\lambda \gamma]}{\lambda \gamma \sinh[\lambda \gamma]} \right) = 2.71 \text{ m}. \quad (12)$$

Стойностите на налягането на $z = 0 \text{ m}$ и $z = 4.9 \text{ m}$ за $\theta = 0$ са:

$$a_i = \frac{P_c}{H^2} (4H - 6h_{\text{сн}}) = 15.2223 \text{ kN/m}^2; \quad b_i = \frac{P_c}{H^2} (-2H + 6h_{\text{сн}}) = 29.2894 \text{ kN/m}^2. \quad (13)$$

Стойността на активния хидродинамичен натиск е значителна част от натоварването. Едната причина е в размерите на резервоара – голяма открита площ с възможност за образуване на вълни. Другата причина е, че собствената честота на активната водна маса попада в участък с голямо спектрално ускорение.

Изчислените стойности за активния и пасивния компонент на хидродинамичното налягане се сумират и се въвеждат като натоварване в изчислителния модел (фиг. 6).



Фиг. 6. Схема на въведеното хидродинамично натоварване на изчислителния модел в цилиндричния резервоар

4. Хидродинамично налягане на правоъгълния резервоар

Размерите на правоъгълния резервоар са съответно височина $H = 5.3$ m и ширина $B = 24$ m. Наличието на вътрешна конструкция (цилиндричния резервоар) ще попречи на формирането на големи вълни по повърхността на водата. Следователно активният хидродинамичен натиск ще бъде значително по-малък спрямо пълен правоъгълен резервоар със същите размери. За да се отчете наличието на вътрешна конструкция, ще се изчисли обемът вода в правоъгълния резервоар

$$V_{\text{rec}} = V_{\text{tot}} - V_{\text{cyl}} = 2026.8 \text{ m}^3 \quad (14)$$

Тогава при същата височина на водния стълб ще се определи еквивалентен размер в план

$$B_{\text{eq}} = \sqrt{V_{\text{rec}} / H} = 19.56 \text{ m.} \quad (15)$$

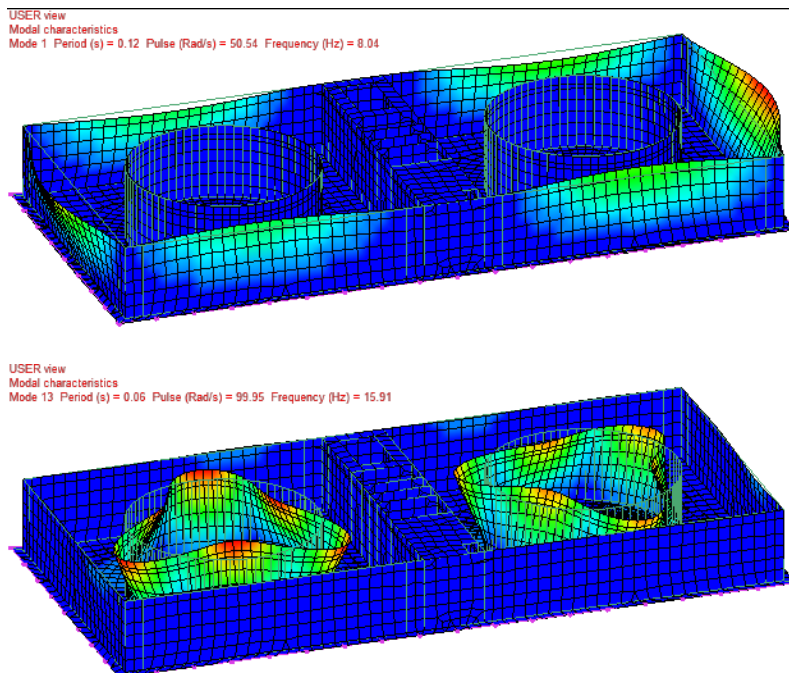
Съгласно [5] е приемливо при правоъгълен резервоар да се ползват формулите за хидродинамично налягане от цилиндричен

$$R = L = 0.5B_{\text{eq}} = 9.78 \text{ m} \quad (16)$$

Следва аналогично определяне на активния и пасивния компонент на хидродинамичното налягане съгласно т. 3 на резервоар с приведени размери $H = 5.3$ m и $R = L = 9.78$ m.

5. Отчитане на стоманобетонните стени на резервоарите

Съгласно [5] инерционните сили на стените на стоманобетонните резервоари трябва да се отчетат при сеизмично въздействие. Това е направено чрез модален анализ на конструкцията, като масите са **само от собствено тегло на стените и плочите** (фиг. 7). Хидродинамичното водно налягане, породено от земетръс, е въведено като площни товари с променлива интензивност.



Фиг. 7. Резултати от проведения модален анализ

Използван е спектър **тип 1** с характеристики за почва **тип С** с референтно земно ускорение $a_{gr} = 0.13g$ и затихване от 5%. За нископериодни конструкции (каквата е изследваната) е по-неблагоприятно да се ползва спектър **тип 1**, тъй като той дава по-високи ускорения за форми с период от 0.1 до 0.2 s.

6. Комбиниране на въздействията

Така изчислените въздействия се комбинират съгласно [1] и [2] със съответните им частни коефициенти.

7. Заключение

Определянето на хидродинамичното налягане съгласно системата Еврокодове има своите особености. Използваните функции на Бessel са подходящи за работа при наличие на автоматизирана изчислителна техника. Определеното с такава висока

точност натоварване не е приложимо за масовите софтуерни платформи за анализ на строителни конструкции и авторите прибегват до трапецовидна апроксимация. Разглежданият пример е особен, тъй като има резервоари, вписани един в друг. За отчитане на този факт авторите са прибегнали до изчисляване на приведени размери, за да не се получи прекалено висока стойност за активното водно налягане.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1991-1 – Въздействие върху строителните конструкции. Основни въздействия.
2. БДС EN 1991-4 – Въздействие върху строителните конструкции. Силози и резервоари.
3. БДС EN 1992-3 – Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Конструкции на резервоари за течности и насипни материали.
4. БДС EN 1998-1 – Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради.
5. БДС EN 1998-4 – Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Силози, резервоари и тръбопроводи.
6. *Meskouris, K., Holschoppen, B.* Seismic analysis of liquid storage tanks, 2nd INQUA, 2011.
7. ИТК-GSDMA, Guidelines for seismic design of liquid storage tanks, 2007.
8. *Priestley, M., Wood, J.* Seismic design of storage tanks, Bulletin of the New Zealand NCEE, Vol. 19, 1986.

HYDRO-DYNAMIC ACTION ON RC WATER RESERVOIRS

R. Orlinov¹, At. Nikolov²

Keywords: *hydrodynamic effects, impulsive and convective pressure, reinforced concrete water tank*

Research area: *seismic design*

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present specific details of the design of reinforced concrete reservoirs according to Eurocode. The design project is for water plant, situated in Lukovit, Bulgaria. The structure consists of cylindrical reservoir, imbedded in a larger reservoir with rectangular shape. Theory and code provisions for determining the hydrodynamic pressure are examined. The two components – impulsive and convective pressure are determined for the design project. All actions are modeled and combined using finite element software.

¹ Radoslav Orlinov, Assist. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: orlinov_fce@uacg.bg

² Atanas Nikolov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: at_nikolov@abv.bg

