

ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ПЛАВАЕМОСТТА НА ВЪНШНИ ЕДНОПАЛУБНИ ПЛАВАЩИ ПОКРИВИ

Любомир Здравков¹

Университет по архитектура, строителство и геодезия

CALCULATION OF THE BUOYANCY OF EXTERNAL SINGLE DECK FLOATING ROOFS

Lyubomir Zdravkov¹

University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy

Abstract: *Floating roofs remain the most used method of reducing losses when storing volatile petroleum products. This is due to the fact that they float on the liquid and are in continuous contact with it, which eliminates the presence of a free surface through which the product can evaporate. In the standards for design of vertical steel cylindrical tanks API Std 650, BS 2654:1989, EN 14015:2004 are written only the conditions under which floating roofs should not sink. Unfortunately, there are no instructions in them how to design the floating roofs to meet the specified requirements. Obviously, each designer is left to survive alone. During his work as a designer of steel vertical tanks, the author came across an analytical methodology for checking the buoyancy of single-deck roofs. It has been applied and tested on a significant number of tanks in Europe, Asia and Africa. Despite the trouble-free operation of the roofs, the author wishes to verify the validity of the results, obtained by analytical methods.*

Key words: *single deck floating roof, pontoon, membrane, buoyancy, stresses, Roark*

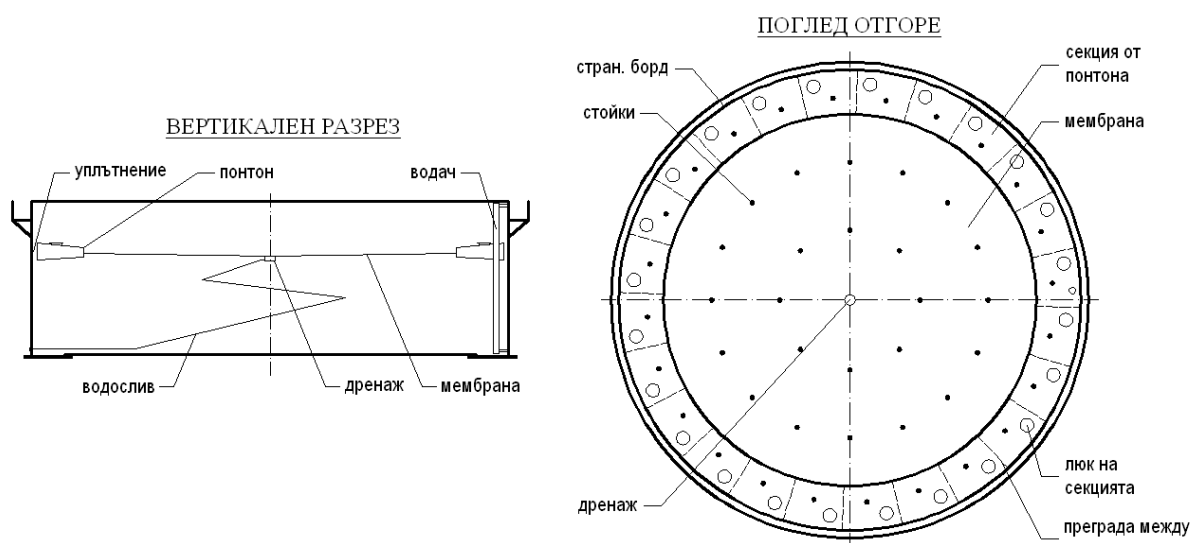
1. Въведение

Плаващите покриви са най-разпространения метод за намаляване на загубите при съхраняване на силно летливи петролни продукти. Това се дължи на факта, че те плават върху течността, в непрекъснат контакт са с нея, което премахва наличието на свободна повърхност, през която продуктът да се изпарява. Фирмата, която първа ги е измислила, построила и въвела в експлоатация през далечната 1923 г., е „Chicago Bridge & Iron”.

През изминалите години конструкцията на плаващите покриви се е развила и разнообразила. Сега в експлоатация са еднопалубни и двупалубни плаващи покриви, като първите имат вариации – с „чиста“ мембрана, с централен понтон в средата, с множество допълнителни поплавци по мембраната. При диаметри на корпуса в

¹ Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, СФ, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, корпус „Б“, 1046 София, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg.

границите $10 \leq D \leq 60$ m най-масовият от плаващите покриви е еднопалубния плаващ покрив. Неговите основни елементи са показани на фиг. 1.



Фигура 1. Еднопалубен покрив с периферен пръстен от понтони

Предимства на еднопалубните покриви:

- а) те са с достатъчно проста и проверена от времето конструкция, която е лесна за изработване и монтаж;
- б) имат нисък разход на метал за единица покрита площ;
- в) не се нуждаят от допълнителни монтажни приспособления.

Недостатъците на еднопалубните плаващи покриви са свързани основно с повишената деформативност на мембраната, която води до:

- а) трудности при изпълнение на мембраната без изпъкналости и вдлъбнатини по нея, с наклон към намиращия се в средата водослив;
- б) склонност на едностранните ъглови заваръчни шевове в мембраната към разрушаване от умора.

В стандартите за проектиране на вертикални стоманени цилиндрични резервоари API Std 650 [1], BS 2654:1989 [2], EN 14015:2004 [3] са записани следните изчислителни състояния, при които плаващите покриви не трябва да потънат:

- а) 250 mm воден стълб от дъжд за период от 24 h, като водосливът е запушен/повреден и не може да отвежда попадналата върху покрива вода;
- б) едновременно са пробити два съседни понтона и мембраната.

В европейския стандарт EN 1993-4-2:2007 [4] изисквания за плаваемостта на покривите липсва, той като в него последните изобщо не се разглеждат. Както в настоящата, така и в бъдещата редакция на стандарта.

В стандарти [1-3] няма указания как да бъдат проектирани плаващите покриви, че да бъдат удовлетворени посочените в тях изисквания. Очевидно всеки проектант е оставен да се оправя сам. В резултат, методите за изчисляване и конструиране на плаващи покриви са резултат от вътрешни фирмени разработки и научни изследвания. Това често води до нежеланието да се споделят с по-широк кръг от проектант, поради което те остават сравнително непознати.

В достъпната литература по темата *Ланишин и др.* [5], *Лессиг и др.* [6], само описват плаващите покриви, без да дават указания за тяхното проектиране. При *Myers* [7] се забелязва градация – освен че са разгледани видовете плаващи покриви и техните елементи, но са записани основните изисквания на стандарт API Std 650 [1]. Книгите на *Каравайченко и др.* [8], и *Long и Garner* [9], са единствените, в които авторът е успял да намери аналитични методи за проверка на достатъчността на плаваемостта на покривите. В статията на *El-Samanody и Noaman* [10] е разгледана възможността за линейно и нелинейно числено изследване на еднопалубните плаващи покриви.

При работата си като проектант на стоманени вертикални резервоари, до автора е достигнала аналитична методика за проверка на плаваемостта на еднопалубните покриви. Тя е прилагана и изпитана при голям брой резервоари в Европа, Азия, Африка. Въпреки безпроблемната експлоатация на покривите им, авторът желае да провери валидността получените чрез аналитичната методика резултати.

2. Аналитичен метод за оразмеряване на еднопалубните покриви

2.1. Проверка на плаваемостта на покривите

Плаваемостта на покрива следва да се провери при следните товарни състояния:

а) симетрично състояние на натоварването:

Тук се разглежда състояние, при което върху покрива има дъждовна вода с височина 250 mm за период от 24 h, което като натоварване е еквивалентно на равномерно разпределено натоварване $p = 2,5 \text{ kN/m}^2$, $\gamma_f = 1,0$. Водосливът е повреден и не може да отвежда попадналата върху покрива вода.

При проверката за плаваемост участват теглата на елементите на плаващите покриви плюс теглото на дъждовната вода с проектна височина 250 mm.

Тази проверка се извършва съгласно закона на Архимед, който, модифициран за конкретната задача ще има следния вид:

$$(1) \quad V \cdot \rho_f = G_r + W,$$

където V е изтласканият от плаващия покрив обем течност;

ρ_f – плътността на съхраняваният продукт. В стандарти [1-3] е посочено, че изчислителната стойност на плътността е $\rho_f = 0,7 \text{ t/m}^3$, независимо от реалната плътност на продукта в резервоара;

W – общото тегло на намиращата се върху покрива вода с височина 250 mm;

G_r – сумарното тегло на плаващия покрив.

От тук, ако плаващият покрив е конструиран с равно дъно, се получава неговото потъване в течността при симетрично състояние:

$$(2) \quad h_r = \frac{G_r + W}{A_r \cdot \rho_f},$$

където h_r е потъването на понтона на плаващия покрив;

A_r – общата площ на плаващия покрив.

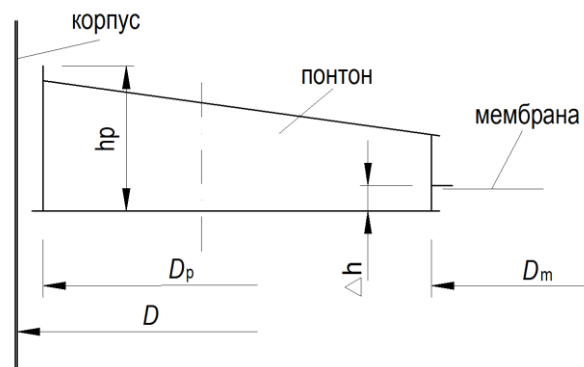
В случай, че дъното на понтона е разположено с Δh по-ниско от мембраната, виж фиг. 2, трябва да се вземе предвид този допълнителен обем изтласкана от понтона течност. Потъването на понтона h_r ще се определи по формулата:

$$(3) \quad h_r = \frac{G_r + W - \Delta V \cdot \rho_f}{A_r \cdot \rho_f} + \Delta h,$$

където ΔV е измественият от понтона обем с височина Δh , т.е. до мембраната на покрива. Изчислява се чрез простичкия израз:

$$(4) \quad \Delta V = \frac{\pi(D_p - D_m)^2}{4} \Delta h,$$

където D_p е външният диаметър на понтона, виж фиг. 2;
 D_m – диаметърът на мембраната.



Фигура 2. Напречно сечение на понтона

б) несиметрично състояние на натоварване от продукт в покрива:

Тук се разглежда състояние, при което едновременно са пробити два съседни понтона и мембраната. В резултат, в пробитите понтони и върху мембраната ще прониква продукт, в резултат на което върху тези елементи не действа Архимедовата сила. Плаваемостта на покрива ще се осигурява само от останалите непробити понтони.

От закона на Архимед имаме само едно равновесно условие ($\Sigma V = 0$). Тук водният подем ще бъде равен на външното натоварване. Изтласканият от понтона обем течност V_p ще бъде:

$$(5) \quad V_p = \frac{G_r}{\rho_f}.$$

Средното потъване на понтона $h_{r,m}$ се определя чрез израза:

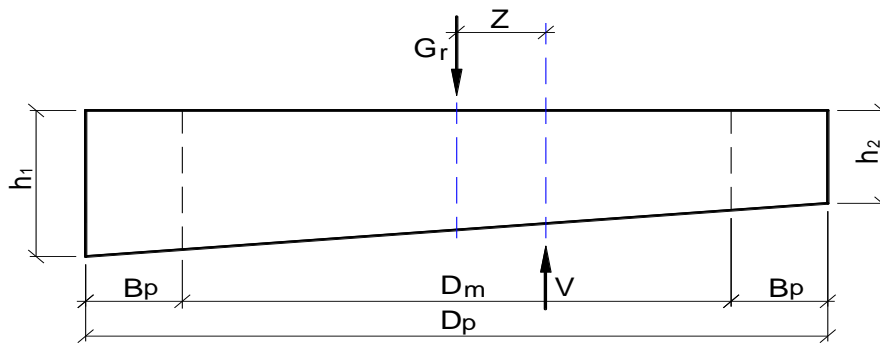
$$(6) \quad h_{r,m} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{4V_p}{\pi(D_p - D_m)^2} \cdot \frac{n_c}{n_c - n_p},$$

където h_1 е потъването на покрива от към страната на пробитите понтони;

h_2 – потъването на покрива в срещуположната страна, виж фиг. 3;

n_c – броят на отсеците (отделенията) в понтона;

$n_p = 2$ – броят на пробитите отсеци в понтона.



Фигура 3. Несиметрично газене на покрива

Второто уравнение в системата следва от условието, че покривът трябва да бъде в равновесие. Завъртащият момент спрямо главната ос на покрива, дължащ се на собственото тегло на конструкцията ще бъде:

$$(7) \quad M_G = G_r \cdot Z,$$

където Z е разстоянието между главната ос на понтона с всички плътни отсеци и понтон с два пробити съседни отсеци.

Потъването на понтона, дължащо се на неговото завъртане, ще бъде както следва:
 - от към пробитите отсеци:

$$(8) \quad d_1 = \frac{G_r \cdot Z}{I_{zz}} \left(\frac{D_p}{2} + Z \right) \frac{1}{\rho_f}$$

- от към здравите (водоплътните) отсеци:

$$(9) \quad d_2 = \frac{G_r \cdot Z}{I_{zz}} \left(\frac{D_p}{2} - Z \right) \frac{1}{\rho_f},$$

където I_{zz} е инерционният момент в хоризонталната равнина на понтона с два пробити отсека.

Общото потъване на понтона ще бъде:

- от към пробитите отсеци:

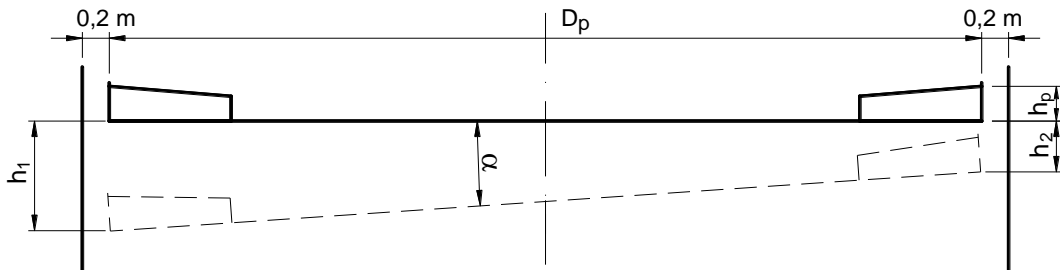
$$(10) \quad h_1 = h_{r,m} + d_1$$

- от към здравите (водоплътните) отсеци:

$$(11) \quad h_2 = h_{r,m} - d_2$$

Ъгълът α на вертикалното завъртане на плаващия покрив, виж фиг. 4, ще се определи чрез израза:

$$(12) \quad \alpha = \arctg\left(\frac{d_1 - d_2}{D_p}\right)$$



Фигура 4. Вертикално завъртане на покрива

2.2. Определяне на деформациите и напреженията в мембраната

Аналитично, деформациите и напреженията в мембраната на еднопалубните плаващи покриви могат да бъдат определени чрез формулите на Roark [11]:

$$(13) \quad \frac{q \cdot a^4}{E \cdot t^4} = K_1 \frac{y}{t} + K_2 \left(\frac{y}{t}\right)^3$$

$$(14) \quad \frac{\sigma \cdot a^2}{E \cdot t^2} = K_3 \frac{y}{t} + K_4 \left(\frac{y}{t}\right)^2,$$

където q е разликата между натоварването отгоре, върху мембраната, и Архимедовата сила, действаща отдолу на мембраната;

$a = D_m/2$ – радиусът на мембраната на плаващия покрив;

E – модулът на еластичността на стоманата;

t – дебелината на листовите в мембраната;

σ – нормалните напрежения в мембраната;

y – провисването на мембраната в средата ѝ, дължащо се на разликата в товарите q ;

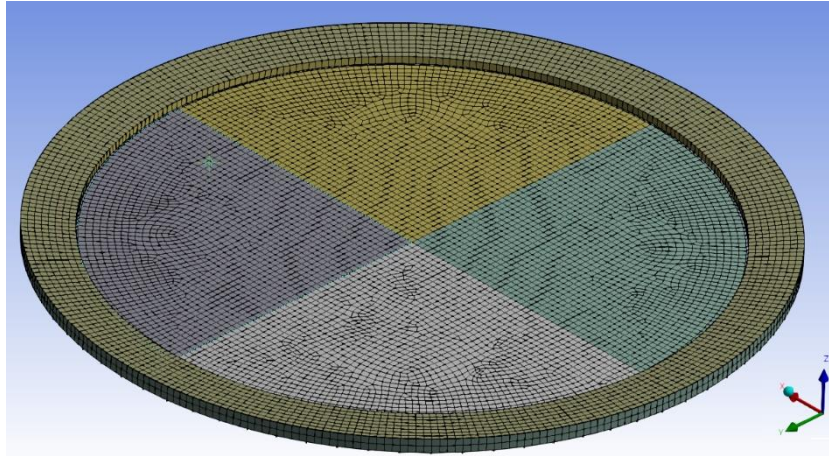
K_1, K_2, K_3 и K_4 – коефициенти, зависещи от условията на опиране на мембраната в нейната периферия.

3. Числен метод за оразмеряване на еднопалубните покриви

За целите на настоящото изследване, чрез програмен продукт ANSYS [12] са моделирани стоманените листови конструкции на два еднопалубни покриви, имащи следните размери:

- а) плаващ покрив на резервоар с обем $V = 1\,200\text{ m}^3$
 - диаметър на корпуса на резервоара – $D = 12\,387\text{ mm}$;
 - външен диаметър на понтона – $D_p = 11\,980\text{ mm}$;
 - вътрешен диаметър на понтона (диаметър на мембраната) – $D_m = 8\,300\text{ mm}$;
 - височина на външния пръстен на понтона – $h_p = 920\text{ mm}$;
 - разстояние между дъното на понтона и мембраната – $\Delta h = 160\text{ mm}$;
 - дебелина на мембраната – $t_m = 5\text{ mm}$;
 - брой на отсеците в понтона – $n_o = 14$ бр.

- б) плаващ покрив на резервоар с обем $V = 32\,000\text{ m}^3$, виж фиг. 5
- диаметър на корпуса на резервоара – $D = 42\,728\text{ mm}$;
 - външен диаметър на понтона – $D_p = 42\,328\text{ mm}$;
 - вътрешен диаметър на понтона (диаметър на мембраната) – $D_m = 36\,328\text{ mm}$;
 - височина на външния пръстен на понтона – $h_p = 870\text{ mm}$;
 - разстояние между дъното на понтона и мембраната – $\Delta h = 140\text{ mm}$;
 - дебелина на мембраната – $t_m = 5\text{ mm}$;
 - брой на отсеците в понтона – $n_o = 26\text{ бр.}$



Фигура 5. Числен модел на еднопалубен плаващ покрив

в) за моделирането на листовите елементи на плаващите покриви е използван 2D елемент shell181. Методът за неговото създаване е “Quadrilateral Dominant”. Крайните елементи са четириъгълни, с 4 възела в ръбовете. Максималният размер на елементите е 200 mm за резервоара с обем $V = 1\,200\text{ m}^3$ и 400 mm за резервоара с обем $V = 32\,000\text{ m}^3$;

г) в моделите на покривите е използвана стомана S235. Нейните механични показатели са съгласно стандарт EN 10025-2:2004 [13]:

- граница на провлачане – $f_y = 235\text{ MPa}$;
- модул на еластичност – $E = 210\,000\text{ MPa}$;
- коефициент на Poisson - $\nu = 0,3$.

д) материалната нелинейност на стомана S235 не е отчитана, т.е. зависимостта напрежения-деформации (σ - ε) е линейна;

е) листовите по долната повърхност на непробитите понтони и мембрана са еластично подпрени. Коравината C се променя линейно, по формулата:

$$(15) \quad C = \rho_f h,$$

където h е дълбочината на потъване на съответния елемент.

ж) при изследването са отчитани нелинейните ефекти от големи вертикални премествания и деформации в елементите на покрива.

4. Резултати

Изследването е проведено при описаните по-горе състояния – симетрично (неработещ водослив), несиметрично (пробити два съседни понтона и мембрана). Към тях е добавено още едно – при нормални условия на експлоатация. При него покривът е

здрав и върху няма вода, хора или сняг. Резултатите от проведеното аналитично и числено изследване подробно са показани по-долу.

4.1. Нормални условия на експлоатация

Таблица 1. Потъване и напрежения в покрива на резервоар с обем $V = 1\,200\text{ m}^3$ при нормални условия на експлоатация

Вид решение	Потъване, mm			Нормални напрежения в мембраната, МПа	
	на понтона	в средата на мембраната		в средата	в снаждането ѝ с понтона
		от проверка за плаваемост	по <i>Roark</i>		
аналитично	321	161	131	16,35	27,74
числено	300	122		2,85	12,58

Таблица 2. Потъване и напрежения в покрива на резервоар с обем $V = 32\,000\text{ m}^3$ при нормални условия на експлоатация

Вид решение	Потъване, mm			Нормални напрежения в мембраната, МПа	
	на понтона	в средата на мембраната		в средата	в снаждането ѝ с понтона
		от проверка за плаваемост	по <i>Roark</i>		
аналитично	239	99	85	0	0
числено	304,6	80,3		4,38	47,02

4.2. Неработещ водослив и 250 mm вода върху мембраната

Таблица 3. Потъване и напрежения в покрива на резервоар с обем $V = 1\,200\text{ m}^3$ при неработещ водослив и 250 mm вода върху мембраната

Вид решение	Потъване, mm			Нормални напрежения в мембраната, МПа	
	на понтона	в средата на мембраната		в средата	в снаждането ѝ с понтона
		от проверка за плаваемост	по <i>Roark</i>		
аналитично	493	333	378	33,03	56,98
числено	465,7	356,1		12,72	84,28

Таблица 4. Потъване и напрежения в покрива на резервоар с обем $V = 32\,000\text{ m}^3$ при неработещ водослив и 250 mm вода върху мембраната

Вид решение	Потъване, mm			Нормални напрежения в мембраната, МПа	
	на понтона	в средата на мембраната		в средата	в снаждането ѝ с понтона
		от проверка за плаваемост	по <i>Roark</i>		
аналитично	502	362	633	48,1	84,66
числено	485,8	437,4		4,94	46,02

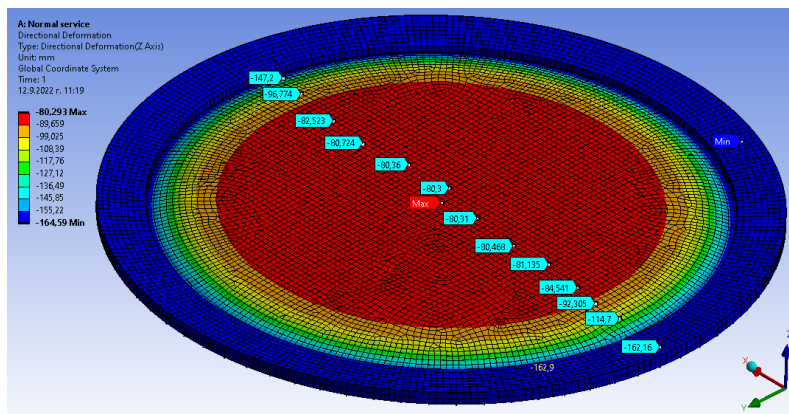
4.3. Пробити два съседни понтона и мембраната

Таблица 5. Потъване и напрежения в покрива на резервоар с обем $V = 1\,200\text{ m}^3$ при пробити два съседни понтона и мембраната

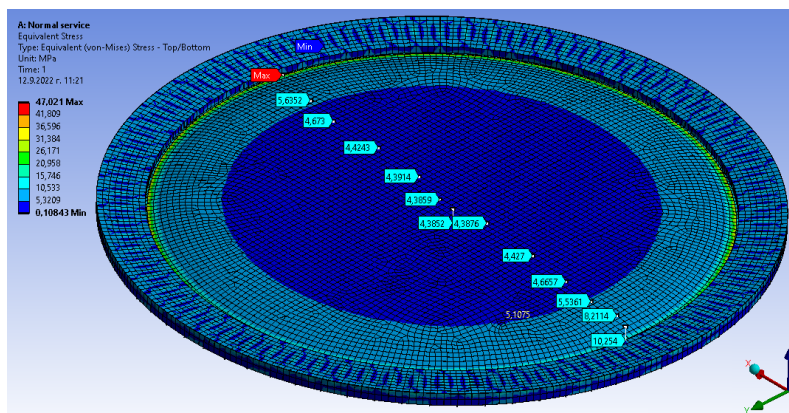
Вид решение	Потъване, mm			Нормални напрежения в мембраната, МПа	
	на понтона, максимално	в средата на мембраната		в средата	в снаждането ѝ с понтона
		от проверка за плаваемост	по <i>Roark</i>		
аналитично	855	389	432	29,5	50,54
числено	753	405,6		11,52	76,3

Таблица 6. Потъване и напрежения в покрива на резервоар с обем $V = 32\,000\text{ m}^3$ при пробити два съседни понтона и мембраната

Вид решение	Потъване, mm			Нормални напрежения в мембраната, МПа	
	на понтона, максимално	в средата на мембраната		в средата	в снаждането ѝ с понтона
		от проверка за плаваемост	по <i>Roark</i>		
аналитично	679	421	697	49,83	87,74
числено	532	689		31,9	107,06



а) преместване на елементите на плаващия покрив



б) нормални напрежения в елементите на плаващия покрив

Фигура 6. Резултати от численото изследване на еднопалубен плаващ покрив

5. Изводи

Аналитично и числено са изследвани два еднопалубни плаващи покрива. Проверени са както потъването на периферния понтон и мембраната, така и нормалните напрежения в средата на мембраната. При сравняване на получените по двата метода резултати определено може да се каже, че има разлики в тях. Според автора те се дължат най-вече на гъвкавостта на мембраната. Изводите, до които авторът е достигнал в настоящото изследване могат да се обобщят до:

а) така представената аналитична методика за определяне на потъването на понтона и мембраната дава по-големи стойности в сравнение с численото решение;

б) получените чрез формулите на *Roark* нормални напрежения в средата на мембраната са по-големи от получените числено. В мястото на снаждане на мембраната с понтона ситуацията е обратната;

в) чрез геометрично нелинейния числен анализ се получават по-точни резултати, в сравнение с аналитичните методи. Независимо от това, последните не следва да бъдат изхвърлени от инструментариума на инженерите-конструктори, тъй като те предоставят възможност за бърза преценка на приетите решения.

Литература

- [1] API Std 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, Thirteenth Edition. American Petroleum Institute, Washington. March 2020.
- [2] BS 2654:1989, Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with but – welded shells for the petroleum industry.
- [3] 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.
- [4] EN 1993-4-2:2007. Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 4-2: Резервоари. БИС, януари, 2010.
- [5] Лапшин А., Колесов А., Агеева, М. Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления. Учебное пособие. Нижний Новгород, ННГАСУ, 2009.
- [6] Лессиг Е., Лилеев А., Соколов А. Листовые металлические конструкции. Москва, Издательство литературы по строительству, 1970.
- [7] Myers P. Aboveground Storage Tanks. McGraw-Hill, 1997. ISBN 0-07-044272-X.
- [8] Каравайченко М., Бабин Л., Усманов Р. Резервуары с плавающими крышами. Москва, Недра, 1992.
- [9] Long, B., Garner, B. Guide to Storage Tanks & Equipment. Professional Engineering Publishing, UK, 2004.
- [10] El-Samanody M., Noaman A. Design and Study of Floating Roofs for Oil Storage Tanks. Mechanics and Mechanical Engineering, vol. 21, № 1, pp. 117-136. Lodz University of Technology, 2017.
- [11] Young W., Budynas R. Roark's Formulas for Stress and Strain, 7th Edition. McGraw-Hill, 2002. ISBN 0-07-072542-X.
- [12] ANSYS® 2020 R2 Documentation. Ansys Inc., Canonsburg, PA, the USA.
- [13] EN 10025-2:2004. Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. November 2004.

To cite this article:

Zdravkov, L. Calculation of the buoyancy of external single deck floating roofs. XXIII international science conference VSU' 2023, Sofia, vol. IV, 2023. ISSN: 1314-071X