

ДОПЪЛНИТЕЛНИ КОНСТРУКТИВНИ РЕШЕНИЯ ЗА ЕДНОПАЛУБНИ ПЛАВАЩИ ПОКРИВИ ПРИ ГОЛЯМОГАБАРИТНИ РЕЗЕРВОАРИ

ст. н. с. II ст. д-р инж. Светослав Ст. Русев
инж. Любомир А. Здравков

Плаващите покриви на вертикалните цилиндрични резервоари са най-разпространеното конструктивно решение за намаляване на загубите при съхраняване на силно летливи петролни продукти. Те могат да бъдат използвани както при отворени отгоре резервоари, така и да бъдат монтирани вътре в резервоари със стационарен покрив, т. нар. вътрешен плаващ покрив.

1. Въведение

Основните предимства на резервоарите с плаващ покрив могат да бъдат обобщени до:

- минимизиране на загубите на съхранявания продукт, които се дължат на изпарението му;
- минимизира се зоната на паро-въздушната смес, в резултат на което силно се понижава корозионната активност в най-горните пояси на корпуса [5];
- повишаване на пожарната безопасност на резервоара, което е резултат от заниженото изпарение на летливи компоненти и затрудненото създаване на взривоопасна смес с въздуха;
- в сравнение с резервоарите с постоянен покрив, площта на пеногасене вътре в резервоарите с плаващ покрив е намалена (фиг. 2), което позволява да се поставят пожарогасителни инсталации с по-малка мощност и тръбите към тях да са с по-малък диаметър [4];
- плаващият покрив почти не предава вертикални (осови) усилия върху корпуса. Намален е и рискът от загуба на устойчивост на корпуса.

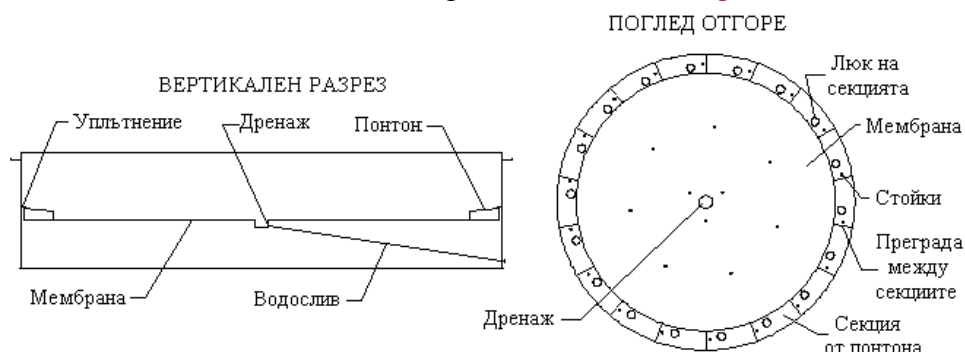
Правилното определяне на типа на покрива и свързаното с него оборудване може да осигури лесна поддръжка и бързо възвръщане на вложените инвестиции. Факторите, които оказват влияние върху конструкцията на резервоара и вида на плаващия покрив са:

- характеристики на съхранявания продукт;
- климатични и строителни условия на площадката;
- обем на съхранявания продукт;
- цялостни изисквания към резервоара като съоръжение.

2. Еднопалубни покриви

Еднопалубният плаващ покрив е най-широко разпространеното конструктивно решение за плаващи покриви. Това се дължи на усвоената и проверена с времето методика за изчисление, (в т.ч. плаваемост), конструиране и техния лесен монтаж.

Принципна схема на този тип плаващи покриви е показана на фиг. 1.



фиг. 1 Еднопалубен покрив, с периферен пръстен от понтони

2.1 Област на приложение [1]:

- в райони с малко ветрово натоварване, където не е възможно откъсване на мембраната от продукта;
- при съхраняване на продукти с ниско парно налягане;

- в райони с малка слънчева активност, когато ниската температура на мембраната спомага за намаляване на изпаряването на продукта;
- най-често при резервоари с диаметър $D \leq 50$ m.

Предимства:

- те са с достатъчно проста конструкция, която е лесна за изработване и монтаж;
- имат нисък разход на метал за единица покрита площ;
- не се нуждаят от допълнителни монтажни приспособления;
- заваръчните шевове в закрито пространство са малко по обем.

Недостатъци:

- повишена деформативност на мембраната, което може да доведе до разрушение на заваръчните шевове от циклична умора;
- наличие на изпъкналости и вдлъбнатини по централната част, които възпрепятстват отвеждането на водата към водослива;
- трудности при изпълнение на мембраната с проектната форма (с наклон към водослива).

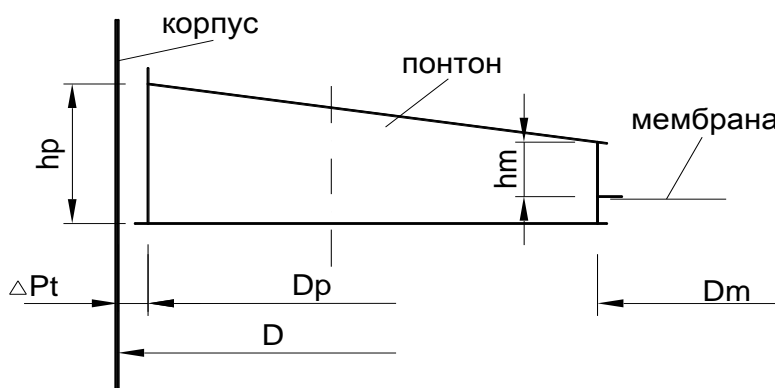
2.2 Установени зависимости

За съжаление в конкретиката, касаеща проектирането на плаващите покриви, има големи липси и празноти. Фирмени методики по търговски причини не се публикуват. В наличните нормативни документи (напр. [7], [8] и [9]), са дадени само най-общи изисквания.

При разработване на програмата “ELEMARI” за изчисляване на елементите на СВР, бе извършен сполучлив опит за установяване на някои зависимости, формиращи преди всичко основните габарити на плаващите покриви [6].

С означенията на **фиг. 2**, предварително могат въведени за удобство две нови величини:

- (1) $\Delta P_t = \frac{D - D_p}{2}$ [m] – разстояние между корпуса на резервоара и понтона;
- (2) $B_p = \frac{D_p - D_m}{2}$ [m] – радиална широчина на понтона.



фиг. 2 Напречно сечение на понтона

Благодарение на някои, макар и доста оскъдни нормативни постановки, посредством изразите (1) и (2), можем да стигнем до основните габарити на понтоните. Така според [7], понтонът на плаващия покрив трябва да има радиус по-малък от радиуса на резервоара с $\min 200$ mm, т.е. $\Delta P_t \geq 0,2$ m. В [6] това предписание бе допълнително диференцирано и поставено в зависимост от диаметъра D на резервоара. Функционалната зависимост между D и ΔP_t е дадена в табличен вид:

ТАБЛИЦА 1

D [m]	≤ 12	$12 \div 64$	$64 \div 75$	> 75
ΔP_t [m]	0,15	0,20	0,25	0,30

Доколкото за всеки резервоар е зададено (или изчислено от обема V) поне неговия диаметър D , то получените апроксимационни зависимости за даден параметър Z са от вида:

$$(3) \quad Z = Z(D)$$

Така с ΔP_t по Таблица 1 и (1), решено спрямо D_p , за диаметъра на плаващия покрив получаваме:

$$(1') \quad D_p = D - 2\Delta P_t [m]$$

Преди да пристъпим към конкретните зависимости, ще се спрем на възприетия подход за установяването им. Базирайки се от една страна на редица публикации, третиращи изпълнени плаващи покриви (напр. [1], [3] и [10]), а от друга – ползвайки собствения си богат дългогодишен проектантски и производствен опит в областта на резервоаростроенето, бе получена достатъчно подробна база данни. Тя бе преценена като напълно обхватна и доверителна, особено в областта на еднопалубните (понтонно-мембранни) плаващи покриви,

За да бъдат максимално елиминирани присъщите на възприетия апроксимационен подход възможни отклонения, още в държавното предприятие “КЗУ” бе разработена нарочна изчислителна програма **APROXIMA – N***. Тя борави със 7 възможни апроксимационни зависимости, като класира автоматично първите две от тях. Тя работи с минимум 3 двойки независими променливи, въведени като входна информация.

В резултат на проведената по Програмата статистическа обработка на базата данни, за основните параметри на еднопалубния плаващ покрив бяха получени следните зависимости от вида (3):

$$(4) \quad B_p = \frac{1}{-a+b} [m]$$

$$(5) \quad h_p = \frac{B_p}{3} [m]$$

$$(6) \quad h_m = \frac{B_p}{6} = \frac{h_p}{2} [m]$$

$$(7) \quad D_m = D_p - 2B_p [m]$$

Аналогични зависимости са установени и за габаритите и теглата на всички конструктивни елементи на плаващия покрив стойки, бариера за пяна, антиротатор и затвор.

3. Закоравяване на мембраната

За условията на България, където натоварването от сняг и вятър, и слънчевата активност не са големи, основният проблем на еднопалубните плаващи покриви е деформативността на мембраната. Тя се явява основно ограничение за използването на такъв тип конструкции при резервоари с диаметър $D > 50$ m. За повишаване на обхвата на тяхната приложимост е необходимо да се вземат допълнителни конструктивни мерки. В практиката са се наложили следните проектни решения:

- допълнителни закоравяващи ребра;
- допълнителен централен понтон;
- комбинация от двете горни решения.

3.1 Допълнителни закоравяващи ребра

С поставянето на корави ребра може да се гони двоен ефект:

- намаляването на вибрациите и на деформациите в централната част на покрива;
- поставянето на достатъчно високи ребра, които са плътно свързани към корав пръстен в центъра, разделя мембраната на по-малки секции, а това предотвратява разливането на продукт

* Програмист инж. В. Чимева, Архив на КЗУ

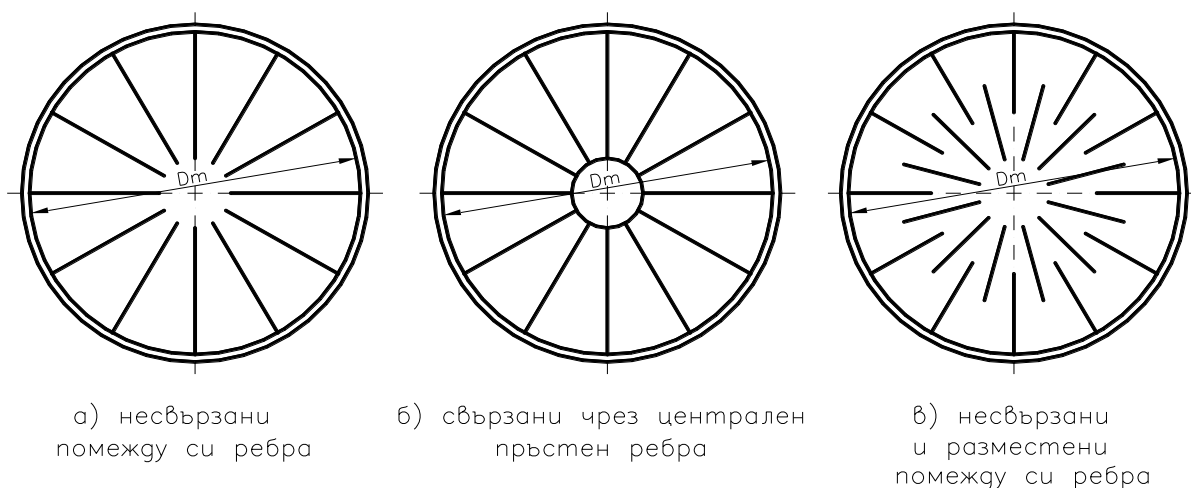
по целия покрив, ако има пробив в мембраната. При това решение е необходимо всяка новообразувана секция да има собствено водоотвеждане, което чрез тръби под покрива се свързва с водослива в средата.

а) радиални закоравяващи ребра

Покриви със закоравена мембрана чрез използването на радиални ребра, има построени в Холандия, Германия, Австрия, САЩ. Видът на тези ребра и тяхното свързване зависят от диаметъра на резервоара. Видове закоравяващи ребра:

- ребра от ламарина. Тя може да бъде допълнително студеноогъната за по-голяма коравина. Използват се за резервоари с по-малки диаметри;
- ребра от горещовалцовани профили. Използват се ъглови, U-профили и 2Т-профили. Удобството тук е улесненият монтаж;
- перфорирани ламарини или греди с отвори в стеблото. Получават се с повишена конструктивна височина и е затруднена антикорозионната защита;
- кутиеобразни ребра. Обикновено се употребяват при резервоари с повишени размери. При кутии с достатъчно сечение е възможно да се намалят размерите на понтоните, защото тези кутиеобразни ребра допълнително осигуряват плаваемост на покрива при течност върху него, т.е. те са едни допълнителни понтони.

Разположението на радиалните ребра по покрива може да има най-различен вид. На **фиг. 3** са показани някои конструктивни решения:

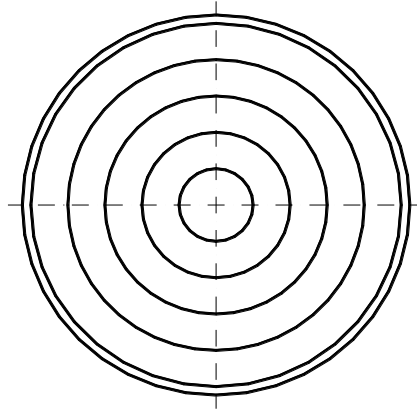


фиг. 3 Разположение на радиални укрепващи ребра по мембраната

- несвързани помежду си ребра. Използва се обикновено, когато ребрата са изработени от ламарина. Те могат да бъдат свързани към понтоните, а могат да са на разстояние от тях;
- свързани чрез централен пръстен ребра. При това решение почти винаги ребрата са свързани с понтоните и работят съвместно с тях. Централният пръстен може да бъде оформен като цилиндър, към който ребрата се свързват челно или да бъде изрязан като един плосък диск, който ляга отгоре върху ребрата. Тук при достатъчна височина на ребрата върху мембраната и централен пръстен, оформен като цилиндър, могат да се оформят самостоятелни секции;
- несвързани и разместени помежду си ребра. Тук укрепващите мембраната ребра са с дължина $\approx 0,25 \cdot D_m$. Благодарение на такава конструкция покривът става по-корав, обаче си работи общо взето както свободна мембрана. Оформянето на самостоятелни секции върху мембраната е невъзможно;

б) пръстеновидни закоравяващи ребра

Пръстеновидни закоравяващи се поставят върху мембраната съгласно схемата (**фиг. 4**):



фиг. 4 Разположение на пръстеновидни укрепващи ребра по мембраната

В Полша [10] са построени множество резервоари с обем $V=50\,000\text{ m}^3$, които са укрепени с пръстеновидно монтирани ребра, с размер $L100\times100\times10\text{ mm}$. При направените замервания на място, за да се определи преместването в средата на мембраната, този начин на укрепване е показал много добра ефективност.

Недостатък на този начин на укрепване е, че ребрата трябва да бъдат поставени под мембраната. Това води до:

- всички монтажни шевове се изпълняват в таванно положение;
- невъзможност за образуване на по-малки сектори върху мембраната;

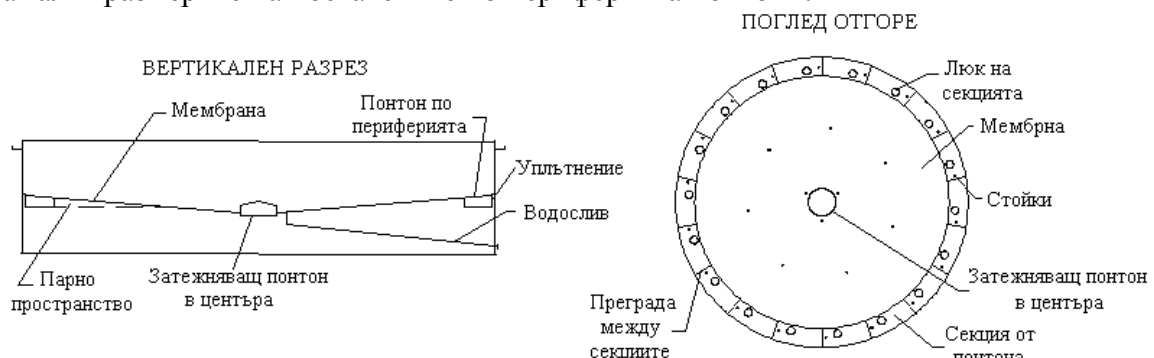
в) радиално и кръгово поставени укрепващи ребра

При използване на пръстеновидни и радиални закоравяващи ребра, разходът на метал и труд е най-голям в сравнение с останалите способности за укрепване на мембраната, но естествено, мембраната е с най-ниска деформируемост.

3.2 Поставяне на допълнителен централен понтон

При конструктивното решение на този тип покрив се гони двоен ефект:

- теглото на поставения в центъра понтон (фиг. 5) улеснява поставянето и задържането на мембраната в проектна форма;
- централният понтон е кук и осигурява допълнителна плаваемост на покрива. Това позволява да се намалят размерите на поставените по периферията понтони.



фиг. 5 Еднопалубен покрив, с понтони по периферията и в центъра

Област на приложение:

- в райони с повишено ветрово натоварване, където е възможно откъсване на мембраната от продукта и това трябва да се предотврати;
- при централна част изпълнена от рулони, когато искаме тя да бъде изпъната;
- най-често при резервоари с диаметър $D > 50\text{ m}$.

Предимства:

- подобрена геометрична форма на централната част;

- повишена плаваемост на покрива в случай на пробиване на мембраната;
- проста конструкция за изработване, монтаж и поддържане;
- сравнително малък разход на метал за единица покрита площ.

Недостатъци:

- усложнен детайл за оттичане на водата.

Проектирането на централен понтон, като допълнително конструктивно решение за еднопалубни плаващи покриви, изискваше от своя страна едно адекватно проучване. В резултат на това, ползвайки [10], за диаметъра на централния понтон D_c , можем да предложим зависимостите:

$$(8) \quad \begin{aligned} D_c &= 0,3.D && \text{за } D = 16 \div 30 \text{ m} \\ D_c &= 0,2.D && \text{за } D = 30 \div 50 \text{ m} \\ D_c &= 0,1.D && \text{за } D > 50 \text{ m} \end{aligned}$$

Височината на централния понтон се приема $h_c = 0,5 \text{ m} = \text{const}$, независимо от диаметъра на резервоара D .

Размерите на поставените по периферията основни понтони, могат да бъдат намалени спрямо установените за еднопалубен покрив (4) ÷ (7), както следва:

$$(9) \quad B'_p = B_p - \frac{c}{D} [m]$$

$$(10) \quad h'_p = \frac{1}{2} \left(d - \frac{c}{D} \right) [m]$$

$$(11) \quad h'_m = \frac{2}{3} h'_p [m]$$

Във формули (4), (9) и (10) коефициентите a , b , c , d са установени по APROXIMA-N. За увеличения в случая диаметър на мембраната D'_m , по аналогия с (7), но с новата радиална ширина на понтона по (9), получаваме израза:

$$(12) \quad D'_m = D_p - 2.B'_p [m]$$

Всички, установени по статистически път апроксимационни зависимости (1) ÷ (12), могат да бъдат съпоставени с габаритите на централен и периферни понтони на резервоар с номинален обем $V = 80000 \text{ m}^3$ и диаметър $D = 73 \text{ m}$, показан на фиг. 7. Съпоставката е извършена таблично и в нея са намерили място установените чрез APROXIMA-N изчислителни стойности и проектното решение разлики (по абсолютна стойност и в процентно изражение).

ТАБЛИЦА 2

Z [m]	ΔPt	B_p	B'_p	D_c	H'_p	H'_m	D'_m
Z_c	0,25	3,95	3,61	7,30	0,9768	0,6512	65,28
()	Табл. 1	(4)	(9)	(8)	(10)	(11)	(12)
Z_p	0,25	-	3,80	7,70	0,96	0,65	64,90
Δ [m]	0	-	- 0,19	- 0,40	+0,0168	+0,0012	+ 0,38
Δ [%]	0	-	- 5,000	- 5,195	+ 1,750	+ 0,185	+ 0,585

ЗАБЕЛЕЖКА: Със Z_c са означени изчислителните стойности по съответната формула, чийто № е даден в по-долния ред (). Със Z_p са дадени стойностите, заложили в проекта на резервоара от фиг. 7.

От Таблица 2 се вижда, че редуцията на радиалната ширина на периферния понтон при наличие на централен е: $\Delta = B_p - B'_p = 3,95 - 3,61 = 0,34 \text{ m}$.

При големия диаметър на резервоара ($D = 73 \text{ m}$) тази редуция, заедно със занижените височини h'_p и h'_m , безспорно ще доведе до значителна икономия от теглото на понтона, превишаваща завишеното тегло на мембраната.

Вижда се също така, че разликите между изчислителните и проектни стойности на съпоставените параметри не надхвърлят $\pm 0,4 \text{ t}$. В процентно отношение тези разлики достигат до $\pm 5 \%$.

4. Изпълнени допълнителни конструктивни решения

4.1 Укрепване на мембраната с радиални ребра

В 2005 г на площадките Palogue и Al-Jabalayn, Судан, бяха монтирани две големи групи резервоари с различно предназначение и обем. Седем от тях, с единична вместимост $V = 52000 \text{ m}^3$ и диаметър $D = 60 \text{ m}$, са с еднопалубен плаващ покрив.

Повишените размери на плаващите покриви наложи допълнителното закоравяване на мембраната. Възприе се идеята да се поставят радиални ребра, които са с различна дължина (фиг. 6). Половината от тези ребра достигат до средата, а останалите – до четвъртината от диаметъра на мембраната.



фиг. 6 Укрепване на мембраната с радиални ребра, Судан

4.2 Укрепване на мембраната с централен понтон

В 1994 г, по проект на фирма „NOELL”, „КЗУ Холдинг” е монтирала резервоар с диаметър $D = 76 \text{ m}$ и обем $V = 80000 \text{ m}^3$ в Германия. Той е съоръжен с еднопалубен плаващ покрив. Поради големият диаметър на резервоара, мембраната е укрепена с централен понтон. Като допълнително средство за намаляване на деформациите в покрива, под него, по надлъжните шевове, снаждащи листовите в централната част, са заварени ребра от ламарина с височина 90 mm .



фиг. 7 Монтаж на резервоар с централен понтон, Германия

5. Изследване и резултати

При еднопалубни плаващи покриви укрепването на мембраната може да стане по няколко начина. За да се определи ефективността на всяко конструктивно решение са създадени и анализирани различни модели.

Изследването за деформативността на мембраната е извършено при следните условия:

а) общи условия за всички изследвания:

- различните модели са 3-мерни и са създадени софтуерно, чрез SAP 2000 v.9;
- диаметър на мембраната $D_m = 30 \div 70$ m;
- първоначален наклон на мембраната $i = 0^0$;
- дебелина на мембраната $t = 5$ mm;
- материал за мембраната – стомана ВСт3пс ($R_y = 225$ MPa) ;

- резервоарът е пълен с вода ($\rho = 10$ kN/m³) ;

- натоварване върху мембраната:

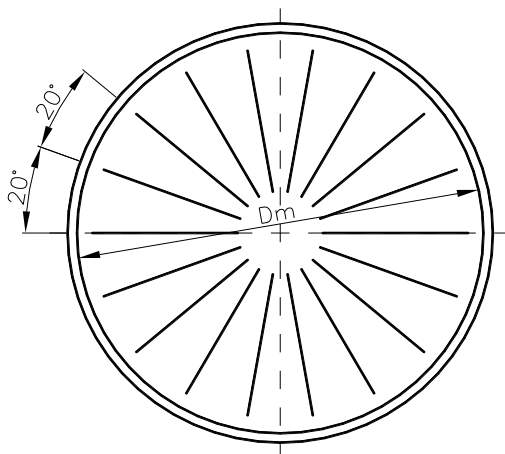
собствено тегло на конструкцията g ;

стълб вода върху мембраната с височина $h = 250$ mm, т. е. натоварването $w = 2,5$ kN/m² ;

парно налягане под мембраната $p = 1,0$ kN/m² .

б) мембрана, укрепена чрез радиално поставени ребра (фиг. 8)

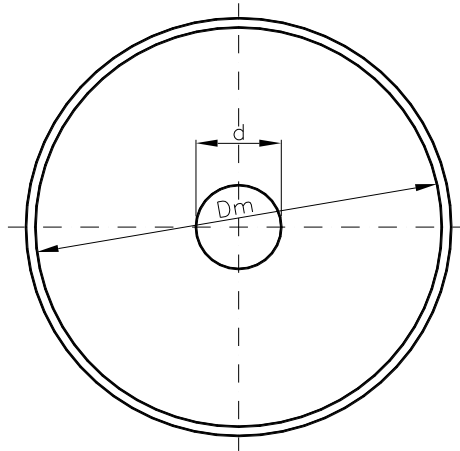
- ребрата са от профил IPE200 и са разположени през 20^0 ;
- ребрата започват на 1 m от понтона на покрива и достигат до условен кръг в центъра с диаметър $d = 0,2.D_m$;



фиг. 8 Укрепване на мембраната чрез радиални ребра

в) мембрана, укрепена чрез централен понтон (фиг. 9)

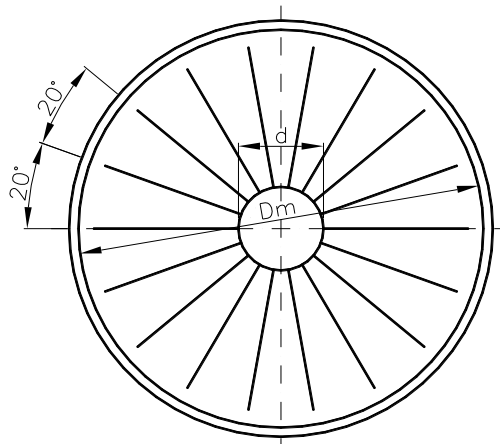
- диаметърът на централния понтон $d = 0,2.D_m$;
- височина на централния понтон $h_p = 0,5$ m;
- дебелина на листовете, изграждащи централния понтон $t_p = 5$ mm;
- централният понтон не е пробит и в него няма вода.



фиг. 9 Укрепване на мембраната чрез централен понтон

г) мембрана, укрепена чрез радиално поставени ребра и централен понтон (фиг. 10)

Условията на изследване са същите, както в б) и в).



фиг. 10 Укрепване на мембраната чрез радиални ребра и централен понтон

Целта на проведеното изследване е да се определи преместването на мембраната в центъра при различните начини на укрепване.

Резултатите са показани в Таблица 3 :

ТАБЛИЦА 3

1. Еднопалубен плаващ покрив без усилване на мембраната

провисване f , m	Диаметър на мембраната, D [m]				
	30	40	50	60	70
собствено тегло g	-0,173	-0,281	-0,379	-0,483	-0,594
вода $w + g$	-0,496	-0,807	-1,087	-1,387	-1,703
парно налягане $p + g$	0,065	0,106	0,143	0,182	0,223
g и вода отдолу	-0,041	-0,041	-0,041	-0,041	-0,041
$w + g$ и вода отдолу	-0,277	-0,302	-0,302	-0,302	-0,302

2. Еднопалубен плаващ покрив с радиални ребра

провисване f , m	Диаметър на мембраната, D [m]				
	30	40	50	60	70
собств. тегло g	-0,197	-0,286	-0,383	-0,488	-0,598
вода $w + g$	-0,542	-0,796	-1,072	-1,371	-1,685
парно налягане $p + g$	0,058	0,090	0,125	0,163	0,203
g и вода отдолу	-0,047	-0,041	-0,041	-0,041	-0,041
$w + g$ и вода отдолу	-0,283	-0,302	-0,302	-0,302	-0,302

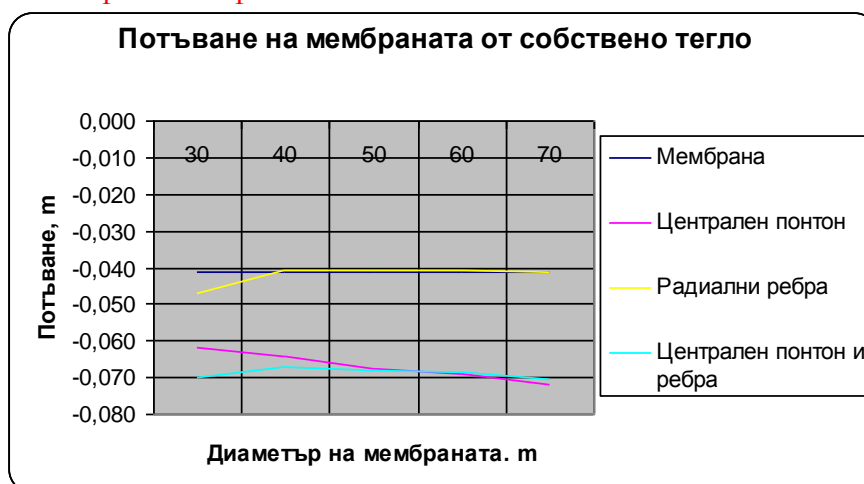
3. Еднопалубен плаващ покрив с централен понтон

провисване f , m	Диаметър на мембраната, D [m]				
	30	40	50	60	70
собств. тегло g	-0,183	-0,2669	-0,360	-0,457	-0,551
вода $w + g$	-0,477	-0,699	-0,941	-1,199	-1,425
парно налягане $p + g$	0,051	0,076	0,101	0,130	0,153
g и вода отдолу	-0,062	-0,064	-0,067	-0,069	-0,072
$w + g$ и вода отдолу	-0,218	-0,231	-0,230	-0,224	-0,212

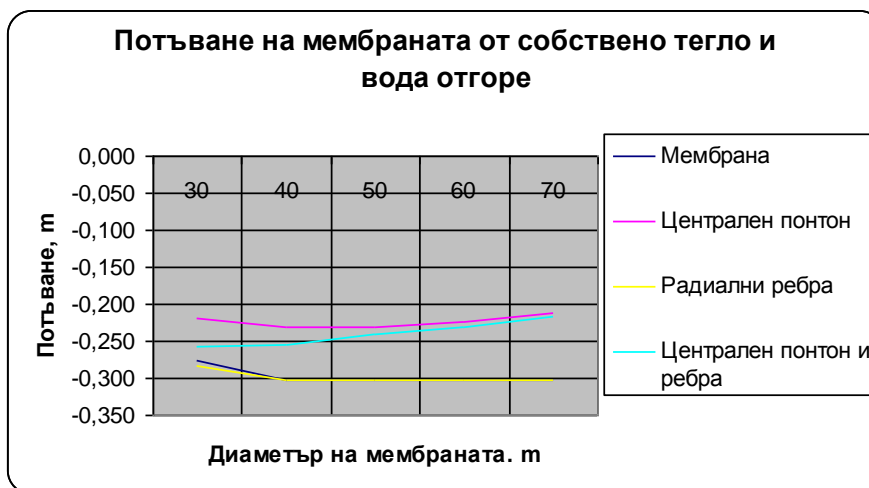
4. Еднопалубен плаващ покрив с централен понтон и радиални ребра

провисване f , m	Диаметър на мембраната, D [m]				
	30	40	50	60	70
собств. тегло g	-0,183	-0,267	-0,360	-0,457	-0,547
вода $w + g$	-0,469	-0,689	-0,928	-1,184	-1,403
парно налягане $p + g$	0,040	0,064	0,088	0,115	0,137
g и вода отдолу	-0,070	-0,067	-0,068	-0,069	-0,070
$w + g$ и вода отдолу	-0,257	-0,254	-0,242	-0,231	-0,217

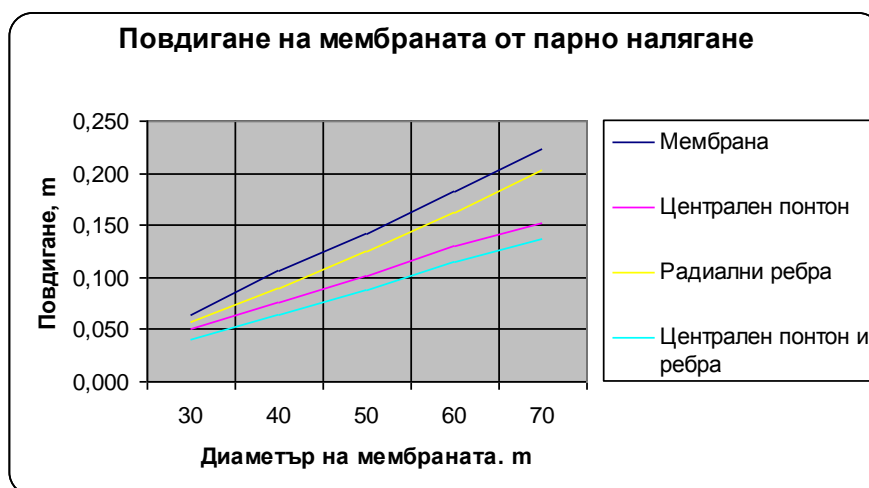
Преместването на централната част на мембраната при различните начини за нейното укрепване е показано на **фиг. 11 ÷ фиг. 13**:



фиг. 11 Потъване на централната част на мембраната в течността от собствено тегло



фиг. 12 Потъване на централната част на мембраната в течността от собствено тегло и 250 mm вода отгоре



фиг. 13 Повдигане на централната част на мембраната от парно налягане

6. Изводи

- потъването на неукрепена мембрана, когато върху нея действа товар от собствено тегло g и/или вода w е постоянна величина;
- потъването на укрепена с радиални ребра IPE 200 мембрана, когато върху нея действа товар от собствено тегло g и/или вода w , при диаметър $D \geq 40$ m, е постоянна величина;
- практически, потъването на централната част на мембраната е едно и също, независимо дали тя е неукрепена или върху нея има поставени радиални ребра;
- потъването на укрепена с централен понтон мембрана, при натоварване от собствено тегло g и вода w , в сравнение с останалите конструктивни решения е най-малко. Това се дължи на по-малкото количество вода върху покрива;
- повдигането на укрепена с централен понтон и радиални ребра мембрана от товар p е най-малко, в сравнение с другите конструктивни решения;
- неукрепената и укрепената с радиални ребра мембрана имат близки стойности на повдигане на централната част от парно налягане p .

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордовский, А. М., Медник, Б. М., и др. Тенденции в развитии комплексных требований к резервуарам для хранения нефти (зарубежный опыт). Основа, 2000.

2. *Здравков, Л. А.* Увеличаване на сигурността на стоманени резервоари, намиращи се в експлоатация. сп. “Строителство”, кн. 5, 2003.
3. *Мельников, Н. П.* Металлические конструкции, 1983.
4. Наредба № 2, Противопожарни строително – технически норми, МВР – МТРС, 1994.
5. *Русев, С. С., Захариева, Н.* Върху корозионната устойчивост на стоманените мазутни резервоари. сп. “Строителство”, кн. 1, 1977.
6. *Русев, С. С.* Автоматизирано изчисляване, оразмеряване и специфициране на СВР. Програма ELEMARI, Архив на КЗУ, 2004.
7. Ръководство за проектиране на СВР, БРВ – КЗР, 1988.
8. API Std 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, 2001.
9. BS 2654:1989, Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with but – welded shells for the petroleum industry.
10. *Ziolko, J.* Zbiorniki metalowe na ciecncze i gazy, Arkady, Warszawa, 1986.