

УДК 539.3:624.04

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРУ З ВОДОЮ ПАЛАЦУ ПІДВОДНИХ ВИДІВ СПОРТУ

Ю.В.Човнюк,

канд. техн. наук, доцент

О.В. Приймаченко,

канд. техн. наук, доцент

С.Ф. Гасанова,

канд. наук з фізичного виховання і спорту, доцент

П.П. Чердніченко,

доцент

Н.С. Шудра,

ст. викладач,

*Київський Національний університет будівництва та архітектури
Повітряних сил пр., 31, м. Київ, 03037, Україна*

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.316-326

У роботі проведений аналіз напруженого стану циліндричного резервуару, який є одним з основних конструктивних елементів спортивної споруди, – палацу підводних видів спорту. При розрахунку циліндричної оболонки резервуару постійної товщини використана моментна теорія. Резервуар – це, по суті, басейн для проведення тренувальних занять з підводного плавання у ластах, дайвінгу, водолазної справи, вважається закріпленим у своїй основі й наповнений рідиною (водою спеціального складу, однорідною по глибині, із заданою питомою вагою). Відомо, що інтегрування розрахункових рівнянь моментної теорії (кругових циліндричних оболонок), а саме: а) диференціальних рівнянь рівноваги; б) рівнянь деформацій; в) рівнянь зусиль, віднесених до одиниці довжини координатної лінії (тангенціальних зусиль, моментів згину), – є складною математичною задачею, пов'язаною з розв'язком системи диференціальних рівнянь у частинних похідних зі змінними коефіцієнтами. Лише розрахунок кривої циліндричної оболонки, у кінцевому рахунку, призводить до системи диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. При припущенні значної глибини резервуару у порівнянні з товщиною його стінок та величиною радіуса основи циліндра (що дозволяє розглядати його як нескінченно довгий) аналітичним шляхом знайдені переміщення та зусилля (тангенціальні й поперечні), згинні моменти. Встановлені місця розташування точок поверхні циліндра, у яких вказані зусилля і моменти набувають максимальних значень, наведені ескізи їх епюр, котрі визначають характер зміни цих фізичних величин (параметрів) по висоті резервуару.

Отримані у роботі результати можуть у подальшому бути використані для уточнення й вдосконалення інженерних методів розрахунку конструктивних елементів спортивних споруд подібного типу, як на етапах їх проектування, так і у режимах реальної експлуатації з метою запобігання ситуацій, пов'язаних з втратою їх міцності та стійкості.

Ключові слова: аналіз, напружений стан, циліндричний резервуар, спортивна споруда, оболонка, розрахунок, моментна теорія.

Постановка проблеми. Зазвичай при проектуванні та експлуатації спортивних споруд, призначених для проведення тренувальних занять та змагань з підводних видів спорту (плавання у ластах, дайвінг, підводне орієнтування та інше) використовують басейни спеціальної конструкції. Вони мають, як правило, циліндричну форму, глибину до 10 м (і більше), й заповнені однорідною рідиною (водою спеціального складу). Тренування у таких басейнах проводять й водолази, а також космонавти, котрі готуються до польотів й проведення робіт у відкритому космосі, в умовах невагомості.

Слід зазначити, що експлуатація таких спортивних споруд повинна бути надійно й довготривалою у зв'язку з високою вартістю їх побудови. Тому на етапах їх проектування і у режимах експлуатації необхідно провести детальний і всебічний аналіз напруженого стану резервуару басейну (як правило, циліндричної форми) з метою запобігання небажаних критичних ситуацій, пов'язаних з руйнуваннями оболонки, втратою її стійкості, котрі можуть виникнути. Отже, розв'язок цієї задачі є актуальним. У місті Києві існує Палац підводного спорту, який

експлуатується вже доволі тривалий період часу. Саме ця обставина і спонукає авторів даної роботи до проведення всебічного науково обгрунтованого дослідження зазначеної проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [1], що розрахункові рівняння моментної теорії оболонок зводяться до наступних: а) диференціальні рівняння рівноваги; б) рівняння деформацій; в) фізичні співвідношення. Інтегрування вказаних рівнянь представляє собою складну математичну задачу, пов'язану з розв'язком системи диференціальних рівнянь у частинних похідних зі змінними коефіцієнтами (у найбільш загальному випадку). Проте розрахунок кругових циліндричних оболонок призводить до системи диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Існує кілька шляхів інтегрування розрахункових рівнянь. Зокрема, якщо розв'язувати задачу у переміщеннях, тоді з рівнянь рівноваги виражають поперечні сили, підставляють їх знову у інші рівняння рівноваги (які ще не були задіяні), замінюють тангенціальні зусилля, згинні та крутні моменти їх виразами через деформації й переміщення, використовуючи рівняння деформації та фізичні співвідношення. Отримана таким шляхом система трьох диференціальних рівнянь у частинних похідних відносно невідомих компонентів переміщень має восьмий порядок. При розв'язуванні задачі у тангенціальних зусиллях виключають з рівнянь рівноваги поперечні сили, зводять їх до трьох рівнянь. До отриманих рівнянь додають три рівняння нерозривності деформацій [2], які виражені через зусилля. Отримана таким шляхом система з шести диференціальних рівнянь у частинних похідних також має восьмий порядок.

Насамкінець, при змішаному методі розв'язку задачі за невідомі приймають частково переміщення й частково зусилля (особливо це стосується симетричних оболонок обертання).

Труднощі розв'язку рівнянь моментної теорії оболонок призвели до побудови спрощених теорій розрахунку, заснованих на ряді припущень, обгрунтованих математичним аналізом й ретельно перевірених експериментами. (До числа таких теорій відносяться: теорія крайового ефекту [3], напівмоментна теорія циліндричних оболонок [4, 5], безмоментна теорія [2], технічна теорія та інші. Тим же можна пояснити і той факт, що з нескінченного розмаїття конструктивних форм оболонок методи розрахунку розроблені лише для небагатьох поверхонь (зокрема, обертання).

У роботі [6] проведений розрахунок кругового циліндричного резервуару постійної товщини h , який закріплений у своїй основі, заповнений рідиною з питомою вагою γ , саме по моментній теорії, проте не досліджені експериментальні значення переміщень, зусиль і моментів, які можуть призвести до втрати стійкості конструкції резервуару з водою і наступних його руйнувань. Саме цим проблемам і присвячене дане дослідження.

Мета роботи полягає у обгрунтуванні уточненого методу розрахунку кругового циліндричного резервуару постійної товщини, закріпленого у своїй основі й наповненого рідиною (водою) з постійною питомою вагою, який моделює конструктивний елемент спортивної споруди – палацу підводних видів спорту. Задля досягнення мети роботи використаний розрахунок вказаної конструкції по моментній теорії оболонок.

Слід зазначити, що у даній роботі використані методи механіки, прикладної теорії пружності, математичної фізики та математичного моделювання [10-21].

Виклад основного матеріалу

1. Розрахуємо за моментною теорією круговий циліндричний резервуар постійної товщини h , який закріплений у основі й наповнений рідиною (водою) з питомою вагою γ (Рис. 1)

Тиск на стінки резервуару (модель басейну для підводних видів спорту) $Z = \gamma \cdot (l - x)$, $X = Y = 0$. Рівняння (розрахункові) у переміщеннях для циліндричної оболонки при цьому приймають наступний вид:

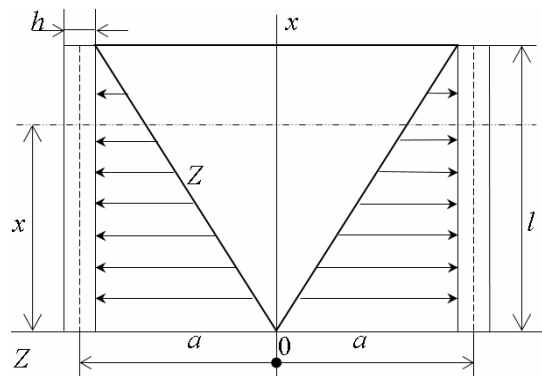


Рис. 1. Геометрія задачі

$$\left\{ \frac{d^2 U_x}{dx^2} = \frac{\nu}{a} \cdot \frac{dU_Z}{dx} = 0; \quad \frac{\nu}{a} \cdot \frac{dU_x}{dx} + \left(\frac{1}{a^2} + \frac{h^2}{12} \cdot \frac{d^4(\dots)}{dx^4} \right) U_Z = \frac{Z}{C}, \right. \quad (1)$$

де: $C = E \cdot h / (1 - \nu^2)$ – циліндрична жорсткість оболонки на розтяг; E – модуль поздовжньої пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; h – товщина оболонки; l – її довжина вповдовж вісі Ox ; a – радіус (основи) оболонки; U_x – переміщення вповдовж вісі Ox ; U_Z – подовж вісі OZ , відповідно, $\frac{d^4(\dots)}{dx^4}$ – x -складова

$$\nabla^4(\dots) = \frac{\partial^4(\dots)}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4(\dots)}{\partial x^2 \partial S^2} + \frac{\partial^4(\dots)}{\partial S^4},$$

де $\nabla^2(\dots)$ – оператор Лапласа у прямокутних координатах, S – довжина лінії впродовж дуги поперечного перерізу оболонки.

Інтегрування першого рівняння системи (1) дає:

$$\frac{dU_x}{dx} + \left(\frac{\nu}{a} \right) \cdot U_Z = C_6, \quad C_6 = const. \quad (2)$$

Використовуючи формулу для визначення зусилля N_x у оболонці вповдовж вісі Ox , знаходимо:

$$N_x = C \cdot \left[\frac{\partial U_x}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial U_S}{\partial S} + \frac{U_Z}{R} \right) \right], \quad R = R(S), \quad (3)$$

$$\frac{N_x}{C} = C_6. \quad (4)$$

При $x = l$, $N_x = 0$, а, відповідно, й $C_6 = 0$, звідки:

$$\frac{dU_x}{dx} = - \left(\frac{\nu}{a} \right) \cdot U_Z. \quad (5)$$

Друге рівняння (1) системи приймає вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d^4 U_Z}{dx^4} + 4 \cdot \lambda^4 \cdot U_Z = \gamma \cdot (l-x) / D, & D = \frac{E \cdot h^3}{[12 \cdot (1 - \nu^2)]} = \frac{h^2 \cdot C}{12}, \\ \lambda^4 = 3 \cdot (1 - \nu^2) / (a^2 \cdot h^2). \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язуючи рівняння U_Z (6), матимемо:

$$U_Z = \exp(-\lambda x) \cdot (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + \exp(\lambda x) \cdot (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) + \gamma \cdot a^2 \cdot (l-x) / (E \cdot h). \quad (7)$$

Інтегруючи рівняння (2) при $C_6 = 0$, отримаємо інші:

$$\begin{aligned} U_x = C_5 - \frac{\nu}{a} \int_0^x U_Z dx = C_5 + \frac{\nu}{2\lambda a} \exp(-\lambda x) [C_1 \cdot (\cos \lambda x - \sin \lambda x) + C_2 \cdot (\cos \lambda x + \sin \lambda x)] - \\ - \frac{\nu}{2\lambda a} \exp(\lambda x) [C_3 \cdot (\cos \lambda x + \sin \lambda x) + C_4 \cdot (\sin \lambda x - \cos \lambda x)] + \frac{\nu \cdot \gamma \cdot a \cdot (l-x)^2}{2Eh}. \end{aligned} \quad (8)$$

Інші крайові умови, що залишилися:

$$x = 0, \quad U_x = U_Z = dU_Z/dx = 0, \quad x = l, \quad M_x = D \cdot \frac{d^2 U_Z}{dx^2} = 0, \quad Q_x = D \cdot \frac{d^3 U_Z}{dx^3} = 0. \quad (9)$$

З цих п'яти крайових умов можна визначити всі інші довільні постійні C_i , $i = \overline{1,5}$.

Значимо, що у разі значної довжини резервуара $l \geq 10$ м у порівнянні з a та h , циліндр можна розглядати як нескінченно довгий. У останньому випадку $C_3 = C_4 = 0$, й крайові умови приймають наступний вид:

$$x = 0, U_x = U_Z = \frac{dU_Z}{dx} = 0. \tag{10}$$

Звідси маємо:

$$\begin{cases} \frac{v}{2\lambda a} \cdot (C_1 + C_2) + \frac{v \cdot \gamma \cdot a \cdot l}{2Eh} + C_5; \\ C_1 + \gamma \cdot a^2 \cdot l / (Eh) = 0; \quad \gamma \cdot (C_1 + C_2) - \gamma a^2 / (Eh) = 0. \end{cases} \tag{11}$$

Розв'язуючи останні два лінійних рівняння для C_1, C_2 у системі (11), матимемо:

$$C_1 = -\frac{\gamma \cdot a^2 \cdot l}{Eh}; \quad C_2 = \frac{\gamma \cdot a^2}{Eh} \cdot ((1/\lambda) - l). \tag{12}$$

тоді з першого рівняння системи (11) отримаємо:

$$C_5 = -\frac{v}{2\lambda a} \cdot (C_1 + C_2) - \frac{v \cdot \gamma \cdot a \cdot l^2}{2Eh}. \tag{13}$$

Переміщення, зусилля й моменти при цьому набувають наступного вигляду:

$$U_Z = \frac{\gamma a^2}{Eh} \cdot \{ l - x - e^{-\lambda x} \cdot [\cos \lambda x + (l - (1/\lambda)) \sin \lambda x] \}, \tag{14}$$

$$N_S = C \cdot \left(\frac{U_Z}{a} + v \cdot \frac{dU_x}{dx} \right) = C \cdot \left(\frac{U_Z}{a} - \frac{v^2}{a} \cdot U_Z \right) = \frac{C \cdot (1 - v^2)}{a} \cdot U_Z, \tag{15}$$

$$M_x = D \cdot \frac{d^2 U_Z}{dx^2} = \frac{\gamma \cdot a \cdot l \cdot h}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - v^2)}} \cdot \exp(-\lambda x) \cdot [(1 - (1/\lambda)) \cdot \cos \lambda x - \sin \lambda x], \tag{16}$$

$$M_S = v \cdot D \cdot \frac{d^2 U_Z}{dx^2}, \quad Q_x = D \cdot \frac{d^3 U_Z}{dx^3}. \tag{17}$$

Найбільший згинний момент M_x буде при $x = 0$:

$$M|_{x=0} = M_0 = (1 - (1/\lambda)) \cdot \frac{\gamma \cdot a \cdot l \cdot h}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - v^2)}}. \tag{18}$$

Максимального значення U_Z та N_S набувають при $x = x^*$, яке визначається з наступного трансцендентного рівняння:

$$\cos(\lambda x^*) - \sin(\lambda x^*) + 2\lambda \cdot \sin(\lambda x^*) = \exp(\lambda x^*). \tag{19}$$

Для випадку: $\lambda x \ll 1$, значення x^* можна знайти з наближеного співвідношення:

$$x^* = 2l - (\lambda/2)^{-1} = 2l - (2/\lambda) = 2(l - (1/\lambda)). \tag{20}$$

Характер епюр M_x та N_S наведений на рисунку 2.

Слід зазначити, що при $l \cdot \lambda = 1$: $M_{x=0} = M_0 = 0$.

2. Розглянемо далі рівновагу товстостінного циліндра з внутрішнім радіусом a та зовнішнім b , який має недеформоване дно, жорстко закріплене з ним при $Z = \pm \tilde{C}$, під дією нормального рівномірно розподіленого внутрішнього тиску p (рис. 3).

Така модель відповідає аналізу напружено-деформованого стану басейну для підводних видів спорту, який виведений з експлуатації і

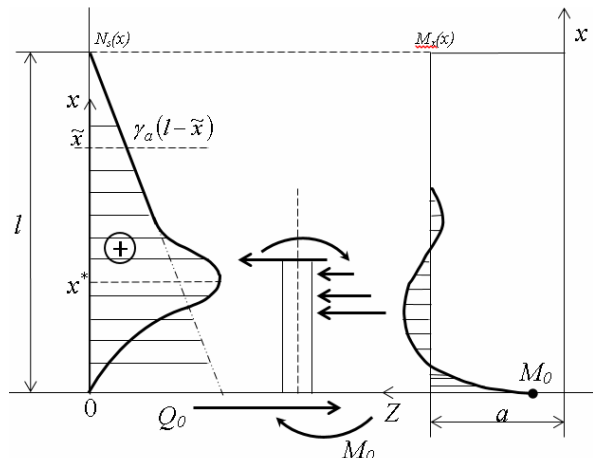


Рис. 2. Характер епюр M_x та N_S

тимчасово законсервованій (наприклад, у зв'язку зі зміною водного середовища, яке його заповнює, у профілактичних цілях, або ж при наявності стихійного лиха, військових дій тощо).

Введемо безрозмірні координати:

$$\rho = r/R; \quad \alpha = Z/R, \quad (21)$$

де $R = \frac{1}{2} \cdot (a+b)$. Тоді інтервали зміни ρ та α будуть:

$$1-\lambda \leq \rho \leq 1+\lambda \leq 1+\lambda, \quad -\alpha_R \leq \alpha \leq \alpha_R; \quad (22)$$

при $\lambda = (b-a)/(b+a)$ – половині відносної товщини стінки циліндра. При цьому:

$$-1 \leq \zeta \leq 1; \quad \alpha_R = \bar{C}/R. \quad (23)$$

У випадку вісесиметричної деформації циліндра напруження та переміщення можна подати через одну бігармонічну функцію напружень ψ [7] за наступними формулами:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\nu \cdot \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} \right); & \sigma_\beta = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\nu \cdot \nabla^2 \psi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \right); \\ \sigma_\alpha = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[(2-\nu) \cdot \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \alpha^2} \right]; & \tau_{\rho\alpha} = \frac{\partial}{\partial \rho} \left[(1-\nu) \cdot \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \alpha^2} \right]; \\ U_\rho = -\frac{(1+\nu) \cdot R}{E} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho \partial \alpha}; & U_\alpha = \frac{(1+\nu) \cdot R}{E} \cdot \left[2 \cdot (1-\nu) \cdot \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \alpha^2} \right], \end{cases} \quad (24)$$

де: $\nabla^2(\dots) = \frac{\partial^2(\dots)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\dots)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial \alpha^2}$, а функцію ψ слід обрати у формі:

$$\psi = [A \cdot I_0(\gamma \rho) + B \cdot \rho \cdot I_1(\gamma \rho) - \bar{C} \cdot K_0(\gamma \rho) - D \rho K_1(\gamma \rho)] \sin \gamma \alpha, \quad (25)$$

де I_0, I_1 – функції Бесселя уявного аргументу нульового та першого порядку, відповідно, K_0, K_1 – функції Макдональда нульового та першого порядку, відповідно; γ – довільний параметр.

Напружений стан, який визначається функцією ψ є симетричним відносно координати α , й у випадку однорідних рішень повинен задовольняти крайовим умовам на бічних поверхнях:

$$\sigma_{\rho=1+\lambda} = 0; \quad \sigma_{\rho=1-\lambda} = 0; \quad \tau_{\alpha,\rho=1+\lambda} = 0; \quad \tau_{\alpha,\rho=1-\lambda} = 0.$$

Підставляючи значення U_α з (24) та (25) у рівняння (26) й прирівнюючи нулю детермінант з коефіцієнтів при невідомих A, B, \bar{C}, D , отримаємо трансцендентне рівняння для визначення параметра γ .

До отриманих розв'язків слід додати розв'язок задачі Ламе [8], котре у прийнятих позначеннях задається формулами:

$$\begin{cases} U_\rho^0 = \frac{(1+\nu) \cdot (1-\lambda^2)^2 \cdot R \cdot p}{4\lambda E \rho} + \bar{C}_1 \cdot \rho; & U_\alpha^0 = \bar{C}_0 + \bar{C}_2 \cdot \alpha; \\ \sigma_\rho^0 = \frac{(1-\lambda)^2}{4\lambda} \cdot \left[1 - \left((1+\lambda)^2 / \rho^2 \right) \right] \cdot p; \\ \sigma_\beta^0 = \frac{(1-\lambda)^2}{4\lambda} \cdot \left[1 + \left((1+\lambda)^2 / \rho^2 \right) \right] \cdot p; \\ \sigma_\alpha^0 = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)R} \cdot \left[2\nu \bar{C}_1 + (1-\nu) \bar{C}_2 \right], & \tau_{\alpha\rho}^0 = 0 \end{cases} \quad (27)$$

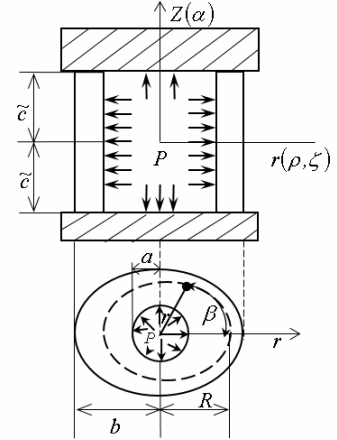


Рис. 3. Розрахункова схема для аналізу стану басейну для підводних видів спорту після виведення його з експлуатації

звідки випливає виконання крайових умов:

$$\sigma_{\rho=1+\lambda}^0 = 0, \quad \sigma_{\rho=1-\lambda}^0 = -p, \quad \tau_{\alpha,\rho=1+\lambda} = 0, \quad \tau_{\alpha,\rho=1-\lambda} = 0. \quad (28)$$

Постійні \bar{C}_1, \bar{C}_2 пов'язані співвідношенням:

$$\bar{C}_1 + \nu \cdot \bar{C}_2 = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot (1-\nu)^2 \cdot R \cdot p}{4E \cdot \lambda}. \quad (29)$$

Сумарна поздовжня сила, діюча на край циліндра:

$$N = 2\pi R^2 \int_{1-\lambda}^{1+\lambda} \sigma_{\alpha}^0 \cdot \rho d\rho. \quad (30)$$

Ця сила викликана тиском на обидва дна циліндра (коли колодязь басейну не наповнений водою). Така ситуація можлива при виведенні басейну з експлуатації у певних цілях (профілактика, зміна води, задля безпеки у зв'язку з військовими діями на території України, при консервації споруди). Тому:

$$N = \pi \cdot (1-\lambda)^2 \cdot R^2 \cdot p. \quad (31)$$

Зі співвідношень (27), (30), (31) маємо:

$$2\nu \cdot \bar{C}_1 + (1-\nu) \cdot \bar{C}_2 = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot (1-\lambda)^2 \cdot R \cdot p}{4E \cdot \lambda}. \quad (32)$$

Розв'язуючи сумісно рівняння (29) та (32), знаходимо:

$$\bar{C}_1 = \bar{C}_2 = \frac{(1-2\nu) \cdot (1-\lambda)^2 \cdot R \cdot p}{4E \cdot \lambda}. \quad (33)$$

Задля спрощення вважаємо циліндр доволі довгим, тобто таким, що задовольняє умові:

$$2\alpha_R > \frac{\pi}{\omega} \sqrt{\lambda}, \quad \omega = 4\sqrt{\frac{3}{4} \cdot (1-\nu^2)}, \quad (34)$$

за якої можна окремо враховувати крайовий ефект від закріплення кожного краю (кінця) циліндра [9].

За допомогою суми розв'язків (27) та однорідних рішень (26) можна задовольнити умовам на торцях циліндра:

$$(U_{\rho})\Big|_{\xi=0} = 0; \quad (U_{\rho})\Big|_{\xi=0} = 0; \quad (\partial U_{\rho} / \partial \alpha)\Big|_{\xi=0} = 0; \quad (\partial U_{\rho} / \partial \alpha)\Big|_{\xi=0} = 0. \quad (35)$$

Наближені значення для переміщень та напружень при однорідних розв'язках мають вид (з урахуванням коригувань та наявних у [9] помилок, котрі у даному дослідженні виправлені):

$$U_{\rho} = \frac{R}{E} \left[(AU_1 - BU_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (BU_1 + AU_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha) + \right. \\ \left. + (\tilde{C}U_1 + DU_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (DU_1 - \tilde{C}U_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha) \right]; \quad (36)$$

$$U_{\alpha} = -\frac{\sqrt{\lambda} \cdot R}{E} \left[(AW_1 + BW_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (AW_2 - BW_1) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha) + \right. \\ \left. + (DW_2 - \tilde{C}W_1) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (DW_1 + \tilde{C}W_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha) \right]; \quad (37)$$

$$\sigma_{\rho} = (Ar_1 - Br_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (Br_1 + Ar_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha) + \\ + (\tilde{C}r_1 + Dr_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (Dr_1 - \tilde{C}r_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha); \quad (38)$$

$$\sigma_{\beta} = (A\beta_1 - B\beta_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (B\beta_1 + A\beta_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha) + \\ + (\tilde{C}\beta_1 + D\beta_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (D\beta_1 - \tilde{C}\beta_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha); \quad (39)$$

$$\sigma_{\alpha} = (AZ_1 - BZ_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (BZ_1 + AZ_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha) + \\ + (\tilde{C}Z_1 + DZ_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \text{ch}(f\alpha) + (DZ_1 - \tilde{C}Z_2) \cdot \cos q\alpha \cdot \text{sh}(f\alpha); \quad (40)$$

$$\tau_{p\alpha} = V\lambda \left[(At_1 + Bt_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \operatorname{ch}(f\alpha) + (At_2 - Bt_1) \cdot \cos q\alpha \cdot \operatorname{sh}(f\alpha) + (Dt_2 - \tilde{C}t_1) \cdot \cos q\alpha \cdot \operatorname{ch}(f\alpha) + (Dt_1 + \tilde{C}t_2) \cdot \sin q\alpha \cdot \operatorname{sh}(f\alpha) \right], \quad (41)$$

де: $\tilde{C} \equiv \bar{C}$;

$$\begin{aligned} U_1 &= 2 + \lambda [2 \cdot (1 - \nu) - 2\nu \cdot \zeta]; & U_2 &= \frac{3\omega^2 \cdot \lambda}{3 \cdot (1 - \nu)} \cdot [(8 - 5\nu) - 3\nu \cdot \zeta^2]; \\ W_1 &= \omega \cdot (1 - (2/3)\omega^2 \lambda) \cdot (W_1^*/2\omega^2 + W_2^*); & W_2 &= \omega \cdot (1 + (2/3)\omega^2 \lambda) \cdot (W_1^*/2\omega^2 - W_2^*); \\ r_1 &= -\lambda \zeta \cdot (1 - \zeta^2); & r_2 &= -\frac{2\omega^2 \nu \lambda}{(1 - \nu^2)} \cdot (1 - \zeta^2); & \beta_1 &= 2 + \lambda \cdot [2 \cdot (1 + \nu) - (2 + 5\nu) \cdot \zeta + \nu \cdot \zeta^3]; & \beta_2 &= 2\omega^2 \cdot \beta_2^*; \\ Z_1 &= -2\lambda \zeta \cdot (1 - \zeta^2); & Z_2 &= 2 \cdot \omega^2 \cdot Z_2^*; & t_1 &= \frac{1}{2\omega} \cdot (1 - (2/3)\omega^2 \lambda) \cdot t^*; \\ t_2 &= \frac{1}{2\omega} \cdot (1 + (2/3)\omega^2 \lambda) \cdot t^*; & W_1^* &= 2\nu + \lambda \cdot [2\nu \cdot (1 - \nu) + (1 + \nu) \cdot (2 - 5\nu) \cdot \zeta + (1 + \nu) \cdot \zeta^2]; \\ W_2^* &= -2\zeta + \lambda \cdot [(2 + 7\nu)/3 - 2 \cdot (1 - \nu) \cdot \zeta + \nu \cdot \zeta^2]; \\ \beta_2^* &= \frac{2\nu}{(1 - \nu^2)} \cdot \zeta + \frac{\lambda}{3 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot [(8 - 7\nu) \cdot (1 + \nu) + 6\nu \cdot (1 - \nu) + 3\nu \cdot (1 + \nu) \cdot \zeta^2]; \\ Z_2^* &= \frac{2}{1 - \nu^2} \cdot \zeta - \frac{1}{3 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot [(2 - \nu) - 6 \cdot (1 - \nu) \cdot \zeta + 3\nu \cdot \zeta^2]; \\ t^* &= \{3 + \lambda \cdot [3 \cdot (1 - \nu) - (1 + \nu) \cdot \zeta]\} \cdot (1 - \zeta^2); \\ q &= \frac{\omega}{\sqrt{\lambda}} \cdot (1 - (2/3)\omega^2 \lambda); & f &= \frac{\omega}{\sqrt{\lambda}} \cdot (1 + (2/3)\omega^2 \lambda) \end{aligned} \quad \text{— коефіцієнти комплексних коренів:}$$

$\gamma_S = \pm q \pm i \cdot f$, $i^2 = -1$, $S = (\bar{1}, \bar{4})$, біквдратного рівняння:

$$\gamma^4 + 4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \lambda^2 + 3 \cdot (1 - \nu^2) / \lambda^2 = 0, \quad (42)$$

яке отримане з трансцендентного рівняння для визначення параметра γ шляхом розкладання функцій Бесселя (I_0, I_1) та функцій Макдональда (K_0, K_1), (див. формулу (25)) в усічений ряд Тейлора за степенями λ із використанням наступного співвідношення:

$$I_0(\gamma) \cdot K_1(\gamma) + I_1(\gamma) \cdot K_0(\gamma) = 1/\gamma. \quad (43)$$

Рівняння крайових умов (35) із урахуванням формули (36) та розв'язку (27) набувають наступної форми:

$$\begin{cases} A \cdot U_1(0) - B \cdot U_2(0) = -K; & \tilde{C} \cdot U_1(0) - D \cdot U_2(0) = -K; \\ A \cdot U_2(0) + B \cdot U_1(0) = \frac{f}{q} \cdot K; & \tilde{C} \cdot U_2(0) - D \cdot U_1(0) = \frac{f}{q} \cdot K, \end{cases} \quad (44)$$

де

$$U_1(0) = 2 \cdot [1 + \lambda \cdot (1 - \nu)]; \quad U_2(0) = \frac{(8 - 5\nu) \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \omega^2} \cdot \lambda; \quad K = \frac{(1 - \lambda)^2 \cdot [(1 + \nu)(1 + \lambda)^2 + (1 - 2\nu)] \cdot p}{4\lambda}.$$

Розв'язок системи (44), якщо знехтувати величинами порядку λ^2 порівняно з одиницею (тобто, $\lambda^2 \ll 1$), як це було зроблено при отриманні рівняння (42), має вид:

$$A = \tilde{C} = -\frac{K}{2} \cdot \left\{ 1 - \lambda \cdot \left[\frac{(8-5\nu)(1+\nu)}{4\omega^2} + (1-\nu) \right] \right\},$$

$$B = D = \frac{K}{2} \cdot \left\{ 1 + \lambda \cdot \left[\frac{3 \cdot (8-5\nu)(1+\nu)}{4\omega^2} - (1-\nu) \right] \right\}. \quad (45)$$

Постійна C_0 у рівнянні (27) визначається з умови:

$$(U_\alpha)_{\alpha=\alpha_R} = 0 \Leftrightarrow \bar{C}_0 = (1-2\nu) \cdot (1-\nu)^2 \cdot R \cdot p \cdot \alpha_R / (4E\lambda). \quad (46)$$

Введемо змінну $\bar{x} = \omega \cdot \alpha / \sqrt{\lambda}$. Оскільки $\lambda \ll 1$, маємо:

$$q\alpha = \bar{x} - \Delta\bar{x}, \quad f\alpha = \bar{x} + \Delta\bar{x} \quad \left(\Delta\bar{x} = \frac{2}{3} \omega^2 \cdot \lambda \cdot \bar{x} \right). \quad (47)$$

Зрозуміло, що:

$$\begin{cases} \exp(-f\alpha) \cdot \cos q\alpha = \Theta(\bar{x}) \cdot \Theta(\Delta\bar{x}) + \eta(\bar{x}) \cdot \eta(\Delta\bar{x}), \\ \exp(-f\alpha) \cdot \sin q\alpha = \eta(\bar{x}) \cdot \Theta(\Delta\bar{x}) - \Theta(\bar{x}) \cdot \eta(\Delta\bar{x}), \end{cases} \quad (48)$$

де $\Theta(\bar{x}) = \exp(-\bar{x}) \cdot \cos \bar{x}$, $\eta(\bar{x}) = \exp(-\bar{x}) \cdot \sin \bar{x}$.

У зв'язку з тим, що $\Delta\bar{x} \ll 1$, маємо:

$$\begin{cases} \exp(-f\alpha) \cdot \cos q\alpha = \Theta(\bar{x}) - \frac{2}{3} \omega^2 \cdot \lambda \cdot \bar{x} \cdot \psi(\bar{x}), \\ \exp(-f\alpha) \cdot \sin q\alpha = \eta(\bar{x}) - \frac{2}{3} \omega^2 \cdot \lambda \cdot \bar{x} \cdot \psi(\bar{x}), \end{cases} \quad (49)$$

де $\psi(\bar{x}) = \Theta(\bar{x}) - \eta(\bar{x})$, $\varphi(\bar{x}) = \Theta(\bar{x}) + \eta(\bar{x})$.

Для даного циліндра подалі від країв напруження не змінюється; їх визначаємо за формулами (27). На краю (наприклад, при $\alpha = 0$) до останніх формул слід додати ще й напруження:

$$\begin{cases} \sigma'_\rho = A \cdot r_1 - B \cdot r_2; & \sigma'_\alpha = A \cdot Z_1 - B \cdot Z_2; \\ \sigma'_\beta = A \cdot \beta_1 - B \cdot \beta_2; & \tau'_{\rho\alpha} = \sqrt{\lambda} \cdot (D \cdot t_2 - \tilde{C} \cdot t_1). \end{cases} \quad (50)$$

Максимальними у даному випадку є розтягуючі напруження σ_α на внутрішніх волокнах циліндра у закріпленому перерізі. Значення цих напружень, віднесених до внутрішнього тиску наведені у таблиці 1. Вони розраховані за допомогою ПЕОМ.

Таблиця 1

Розрахункові значення σ_α/p , σ_α^*/p

$\sigma = (b-a)/(a+b)$	0,01	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
σ_α/p	103,3	21,84	11,66	8,27	6,57	5,56
σ_α^*/p	102,5	20,50	10,25	6,83	5,12	4,10
$\delta = \frac{(\sigma_\alpha - \sigma_\alpha^*) \cdot 100\%}{\sigma_\alpha}$	0,77	6,14	12,10	17,40	22,10	26,10

У таблиці прийняті наступні позначення: σ_α – напруження розраховані за формулами даного дослідження; σ_α^* – напруження у закріпленій циліндричній оболонці за теорією Кірхгофа-Лява.

Зрозуміло, що при $\lambda < 0,05$ теорія тонких оболонок дає досить точні результати.

Висновки

1. Обґрунтована фізико-механічна модель, за допомогою якої проведений всебічний аналіз напруженого стану циліндричного резервуару з водою (палацу підводних видів спорту).

2. Для визначення основних параметрів напруженого стану (та деформацій) вказаного резервуару (наповненого водою та без неї) використана моментна теорія. Отримані аналітичні вирази, які визначають характеристики напружено-деформованого стану циліндра. За вказаними аналітичними виразами проведені числові розрахунки на ПЕОМ, які визначають критичні точки (що відповідають максимальним значенням) розтягуючих моментів по висоті конструкції циліндричного резервуара.

3. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних розрахунків споруд подібного типу як на стадіях їх проектування, конструювання та будівництва, так і у режимах реальної експлуатації з метою запобігання виникненню надмірних напружень та аварійних ситуацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Рекач В.Г.* Руководство к решению задач прикладной теории упругости. М: Высшая школа, 1984. 287 с.
2. *Гольденвейзер А.Л.* Теория упругих тонких оболочек. – М., 1953. 320 с.
3. *Geckeler I.W.* Forschungsarbeiten. – Berlin, 1926. №276.
4. *Власов В.З.* Новый практический метод расчёта складчатых покрытий и оболочек. Строительная промышленность. 1932. №11, 12.
5. *Finsterwalder U.* Die Theorie der zylindrischen Schalengewölbe Sistem — Zeiss—Dywidag u ihre Anwendung auf die Grossmarkthalle Budapest. Int. Vereinig Brucken — U. Hochball, Abh. 1, 1932; Ing. Arch. 1933. Bd. 4. s. 43.
6. *Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. – М., 1963. 420 с.
7. *Ляв А.* Математическая теория упругости. – М. – Л., 1935. 360 с.
8. *Рекач В.Г.* Руководство к решению задач по теории упругости. – М.: Наука, 1977. 220 с.
9. *Прокопов В.К.* Равновесие упругого осесимметричного нагруженного толстостенного цилиндра. Прикладная математика и механика. 1949. Т. XIII, Вып.2. С. 123-128.
10. *Григоренко Я.М., Мольченко Л.В.* Основи теорії пластин та оболонок з елементами магнітопружності. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2009. 403 с.
11. *Григоренко Я.М., Влайков Г.Г., Григоренко А.Я.* Численно-аналитическое решение задач механики оболочек на основе различных моделей. – К., 2006. 280 с.
12. *Бернакевич І.С., Вагін П.П., Козій І.Я., Харченко В.М.* Аналіз задачі стійкості тонких оболонок, податливих до зсуву та стиснення. Математичні методи та фізико-механічні поля. 2016. Т.59, №4. С. 91–96.
13. *Кушнір Р.М., Николишин М.М., Осадчук В.А.* Пружний та пружно-пластичний граничний стан оболонок з дефектами. – Львів: Сполом, 2003. 320 с.
14. *Шутенко Л.М., Пустовойтов В.П., Засядько М.А.* Механіка споруд. – Харків: ХДАМГ, 2001. 234 с.
15. *Гудяев В. И., Баженов В.А., Лизунов П.П.* Неклассическая теория оболочек и ее приложение к решению инженерных задач. – Львов: Вища школа, 1978. 192 с.
16. *Григоренко Я.М., Василенко А.Т.* Теория оболочек переменной жёсткости. – Київ: Наукова думка, 1981. 544 с.
17. *Гавриленко Г.Д., Ситник А.С., Мацнер В.И.* Об оценке нижних пределов критических нагрузок цилиндрических оболочек. Прикладная механика. 2006. Том. 42, № 10. С. 78-85.
18. *Ванин Г. А.* Концентрация напряжений в моментной теории. Прикладная механика. 2007. Т. 43. №1. С. 66-76.
19. *Дудик М.В., Діхтаренко Ю.В.* Сучасні методи теорії пружності. – Умань: ПП «Жовтий», 2015. 108 с.
20. *Orynyak I., Bai Y.* Coupled approximate long and short solutions versus exact Navier and Galerkin ones for cylindrical shell under radial load. Thin-Walled Structures. 2022. V. 170. 108536. P. 145-150.

REFERENCES

1. *Rekach V.H.* Rukovodstvo k resheniyu zadach prykladnoi teoryy upruhosti. (A guide to solving problems in applied elasticity theory). - M: Vysshaya shkola, 1984. 287 s.
2. *Holdenveizer A.L.* Teoryia upruhokh tonkykh obolochek. (Theory of elastic thin shells). – M., 1953. 320 s. {
3. *Geckeler I.W.* Forschungsarbeiten. – Berlin, 1926. №276.
4. *Vlasov V.Z.* Novyi praktycheskiy metod raschota skladchatykh pokrytyy u obolochek. (A new practical method for calculating folded coverings of shells). Stroytelnaia promyshlennost. 1932. №11, 12.
5. *Finsterwalder U.* Die Theorie der zylindrischen Schalengewölbe Sistem — Zeiss—Dywidag u ihre Anwendung auf die Grossmarkthalle Budapest. Int. Vereinig Brucken — U. Hochball, Abh. 1, 1932; Ing. Arch. 1933. Bd. 4. s. 43.
6. *Tymoshenko S.P., Voinovskiy-Kryher S.* Plastyanky u obolochky. (Plates and shells). – M., 1963. 420 s.
7. *Liav A.* Matematycheskaia teoryia upruhosti. (Mathematical theory of elasticity). – М. – Л., 1935. 360 s.
8. *Rekach V.H.* Rukovodstvo k resheniyu zadach po teoryy upruhosti. (A guide to solving problems in elasticity theory). – М.: Nauka, 1977. 220 s.
9. *Prokopov V.K.* Ravnovesye upruhoogo osesymmetrychnoho nahruzhennoho tolstostennoho tsylyndra. (Equilibrium of an elastic ax symmetric loaded thick-walled cylinder). Pрыkladnaia matematyka u mekhanika. 1949. Т. XIII, Vyp.2. P. 123-128.
10. *Hryhorenko Ya.M., Molchenko L.V.* Osnovy teorii plastyyn ta obolonok z elementamy mahnitopruzhnosti. (Fundamentals of the theory of plates and shells with elements of magnetoelasticity). – К.: Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Kyivskiy universytet», 2009. 403 s.

11. Hryhorenko Ya.M., Vlaikov H.H., Hryhorenko A.Ia. Chylenno-analytycheskoe reshenye zadach mekhaniky obolochek na osnove razlychnykh modelei. (Numerical and analytical solution of shell mechanics problems based on various models). – K., 2006. 280 s.
12. Bernakevych I.Ie., Vahin P.P., Kozii I.Ia., Kharchenko V.M. Analiz zadachi stikosti tonkykh obolonok, podatlyvykh do zsuvu ta stysnennia. (Analysis of the problem of stability of thin shells that are susceptible to shear and constraint). Matematychni metody ta fizyko-mekhanichni polia. 2016. T.59, №4. S. 91–96.
13. Kushnir R.M., Nykolyshyn M.M., Osadchuk V.A. Pruzhnyi ta pruzhno-plastychnyi hranychnyi stan obolonok z defektamy. (Elastic and elastic-plastic boundary state of shells with defects). – Lviv: Spolom, 2003. 320 s.
14. Shutenko L.M., Pustovoitov V.P., Zasiadko M.A. Mekhanika sporud. (Mechanics of structures). – Kharkiv: KhDAMH, 2001. 234 s.
15. Huliaev V.Y., Bazhenov V.A., Lyzunov P.P. Neklassycheskaia teoriya obolochek y ee prylozhenye k resheniyu ynzhenernykh zadach. (Non-classical theory of shells in its application to solving engineering problems). – Lvov: Vyshcha shkola, 1978. 192 s.
16. Hryhorenko Ya.M., Vasylenko A.T. Teoriya obolochek peremnoi zhystkosti. (Theory of shells of variable stiffness). – Kyiv: Naukova dumka, 1981. 544 s.
17. Navrylenko H.D., Sytnyk A.S., Matsner V.Y. Ob otsenke nyzhnykh predelov krytycheskykh nahruzok tsylindrycheskykh obolochek. (On assessing the lower limits of critical loads of cylindrical shells). Prykladnaia mekhanika. 2006. Tom. 42, № 10. S. 78-85.
18. Vanyn H.A. Kонтсentratsiia napriazheniy v momentnoi teorii. (Stress concentration in moment theory). Prykladnaia mekhanika. 2007. T. 43. №1. S. 66-76.
19. Dudyk M.V., Dikhtiarenko Yu.V. Suchasni metody teorii pruzhnosti. (Modern methods of elasticity theory). – Uman: PP «Zhovtyi», 2015. 108 s.
20. Orynyak I., Bai Y. Coupled approximate long and short solutions versus exact Navier and Galerkin ones for cylindrical shell under radial load. Thin-Walled Structures. 2022. V. 170. 108536. P. 145-150.

Стаття надійшла 11.04.2024

Човнюк Ю.В., Приймаченко О.В., Гасанова С.Ф., Чередніченко П.П., Шудра Н.С.

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРУ З ВОДОЮ ПАЛАЦУ ПІДВОДНИХ ВИДІВ СПОРТУ

У роботі проведений аналіз напруженого стану циліндричного резервуару, який є одним з основних конструктивних елементів спортивної споруди, – палацу підводних видів спорту. При розрахунку циліндричної оболонки резервуару постійної товщини використана моментна теорія. Резервуар – це, по суті, басейн для проведення тренувальних занять з підводного плавання у ластах, дайвінгу, водолазної справи, вважається закріпленим у своїй основі й наповнений рідиною (водою спеціального складу, однорідною по глибині, із заданою питомою вагою). Відомо, що інтегрування розрахункових рівнянь моментної теорії (кругових циліндричних оболонок), а саме: а) диференціальних рівнянь рівноваги; б) рівнянь деформацій; в) рівнянь зусиль, віднесених до одиниці довжини координатної лінії (тангенціальних зусиль, моментів згину), – є складною математичною задачею, пов'язаною з розв'язком системи диференціальних рівнянь у частинних похідних зі змінними коефіцієнтами. Лише розрахунок кривої циліндричної оболонки, у кінцевому рахунку, призводить до системи диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. При припущенні значної глибини резервуару у порівнянні з товщиною його стінок та величиною радіуса основи циліндра (що дозволяє розглядати його як нескінченно довгий) аналітичним шляхом знайдені переміщення та зусилля (тангенціальні й поперечні), згинні моменти. Встановлені місця розташування точок поверхні циліндра, у яких вказані зусилля і моменти набувають максимальних значень, наведені ескізи їх епюр, котрі визначають характер зміни цих фізичних величин (параметрів) по висоті резервуара.

Отримані у роботі результати можуть у подальшому бути використані для уточнення й вдосконалення інженерних методів розрахунку конструктивних елементів спортивних споруд подібного типу, як на етапах їх проектування, так і у режимах реальної експлуатації з метою запобігання ситуацій, пов'язаних з втратою їх міцності та стійкості.

Ключові слова: аналіз, напружений стан, циліндричний резервуар, спортивна споруда, оболонка, розрахунок, моментна теорія.

Chovniuk Yu.V., Prymachenko O.V., Hasanova S.F., Cherednichenko P.P., Shudra N.S.

STRESS STATE ANALYSIS OF A CYLINDRICAL TANK WITH WATER OF AN UNDERWATER SPORTS PALACE.

The paper analyzes the stress state of a cylindrical tank, which is one of the main structural elements of a sports facility - an underwater sports palace. In the calculation of the cylindrical shell of the tank of constant thickness, the moment theory was used. The reservoir is, in fact, a swimming pool for conducting training sessions on underwater swimming in fins, diving, diving, is considered fixed in its base and filled with liquid (water of a special composition, homogeneous in depth, with a given specific gravity). It is known that integration of the calculation equations of the moment theory (of circular cylindrical shells), namely: a) differential equations of equilibrium; b) equations of deformations; c) equations of forces attributed to the unit length of the coordinate line (tangential forces, bending moments), is a complex mathematical problem associated with solving a system of partial differential equations with variable coefficients. Only the calculation of the curve of a cylindrical shell ultimately leads to a system of differential equations with constant coefficients. Under the assumption of significant depth of the tank compared to the thickness of its walls and the value of the radius of the cylinder base (which allows us to consider it as infinitely long), displacements and forces (tangential and transverse), bending moments are analytically found. The locations of the cylinder surface points, in which the indicated forces and moments acquire maximum values, have been determined; sketches of their

diagrams, determining the character of change of these physical quantities (parameters) along the height of the tank, have been given.

The results obtained in the work can be further used to clarify and improve engineering methods of calculation of structural elements of sports facilities of this type, both at the stages of their design and in the modes of real operation in order to prevent situations associated with the loss of their strength and stability.

Keywords: analysis, stress state, cylindrical tank, sports facility, shell, calculation, moment theory.

УДК 539.3:624.04

Човнюк Ю.В., Приймаченко О.В., Гасанова С.Ф., Чередніченко П.П., Шудра Н.С.

Аналіз напруженого стану циліндричного резервуару з водою палацу підводних видів спорту//Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.:КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 316-326.

У роботі проведений аналіз напруженого стану циліндричного резервуару, який є одним з основних конструктивних елементів спортивної споруди, – палацу підводних видів спорту.

Табл. 1. Іл. 3. Бібліогр. 20 назв.

UDC 539.3:624.04

Chovnyuk Yu.V., Pryimachenko O.V., Hasanova S.F., Cherednichenko P.P., Shudra N.S. **Stress state analysis of a cylindrical tank with water of an under water sports palace** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientificand-technical collected articles- K.: KNUBA, 2024. – Issue 112. – P. 316-326.

The paper analyzes the stress state of a cylindrical tank, which is one of the main structural elements of a sports facility - an underwater sports palace.

Tabl. 1. Fig. 3. Ref. 20.

Автор (науковий ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичного виховання і спорту ЧОВНЮК Юрій Васильович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітряних сил проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Робочий тел.: +38 (044) 245-48-29

Мобільний тел.: +38 (096) 570-45-65

E-mail: ychovnyuk@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0608-0203>

Автор (науковий ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри міського будівництва Приймаченко Олексій Віталійович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітряних сил проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 245-42-04

Мобільний тел.: +38(067) 266-81-97

E-mail: pryimachenko.ov@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5125-8472>

Автор (науковий ступень, вчене звання, посада): канд. наук з фізичного виховання і спорту, доцент кафедри фізичного виховання і спорту Гасанова Саїда Фарухівна

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітряних сил проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 248-30-25

Мобільний тел.: +38(066)9963610

E-mail: gasanova.sf@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9341-5819>

Автор (науковий ступень, вчене звання, посада): доцент, доцент кафедри міського будівництва Чередніченко Петро Петрович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Роб. тел. +38(044) 245-42--4

Мобільний тел.: +38(067) 442-13-41

E-mail: petro_che@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7161-661X>

Автор (науковий ступень, вчене звання, посада): ст. викладач кафедри інженерної геодезії Шудра Наталія Сергіївна

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітряних сил проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 249-72-51

Мобільний тел.: +38 (063) 129-30-33

E-mail: shudra.ns@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5416-7680>