

**ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
ТОВСТОСТІННИХ ЕЛІПСОЇДАЛЬНИХ ЄМНОСТЕЙ  
ПРАЦЮЮЧИХ ПІД ТИСКОМ**

**В. І. Бойко**, д-р техн. наук;

**Г. В. Куценко\***, д-р техн. наук, професор;

**В. Г. Мусіяка\*\***, канд. фіз.-мат. наук, професор;

**В. І. Сухомлин**, канд. техн. наук, доцент;

**Ю. І. Рейдерман**, канд. техн. наук, доцент;

**Д. В. Носов\***, канд. техн. наук, доцент,

Дніпродзержинський державний технічний університет,

м. Дніпродзержинськ;

\*Київський національний університет, м. Київ;

\*\*Дніпропетровський національний університет, м. Дніпропетровськ

Запропонована математична модель стану стінки еліпсоїдного днища реактора ВВЕР-1000 при навантаженні його внутрішнім тиском. При цьому крайовими умовами були відсутність напружень на зовнішній поверхні й наявність на внутрішній поверхні тільки нормальних до неї напружень, що за величиною дорівнюють внутрішньому тиску. Алгоритм розв'язання моделі реалізований програмно, що дозволило провести серію розрахунків на визначення напружено-деформованого стану еліпсоїдного товстостінного днища, працюючого під тиском, і використовувати отримані результати для перевірки міцності й надійності корпусу.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, товстостінний еліпсоїд, ємність, реактор ВВЕР-1000, математична модель.

Предложена математическая модель состояния стенки эллипсоидального днища реактора ВВЭР-1000 при нагружении его внутренним давлением. При этом крайевыми условиями являлись отсутствие напряжений на наружной поверхности и наличие на внутренней поверхности только нормальных к ней напряжений, по величине равных внутреннему давлению. Алгоритм решения модели реализован программно, что позволило провести серию расчетов по определению напряженно-деформированного состояния эллипсоидального толстостенного днища, работающего под давлением, и использовать полученные результаты для проверки прочности и надежности корпуса.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, толстостенный эллипсоид, емкость, реактор ВВЭР-1000, математическая модель.

### ВСТУП

При порівнянні сферичних і циліндричних ємностей пріоритет використання належить останнім. Циліндричні ємності зустрічаються набагато частіше, ніж сферичні. Витрата металу на одиницю ваги речовини, збереженої в них, більша, ніж у сферичних ємностях (див. рис. 1), але технологія виготовлення циліндричних ємностей, зручність розміщення забезпечують їм пріоритет у використанні.

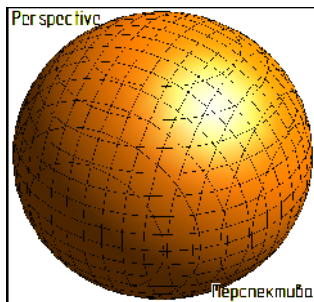


Рисунок 1 - Схематичне зображення сферичної ємності

Це стосується лише тонкостінних оболонок. Зі збільшенням товщини стінки показник технологічної витрати металу висуває як альтернативу еліпсоїдальну оболонку (рис. 2).

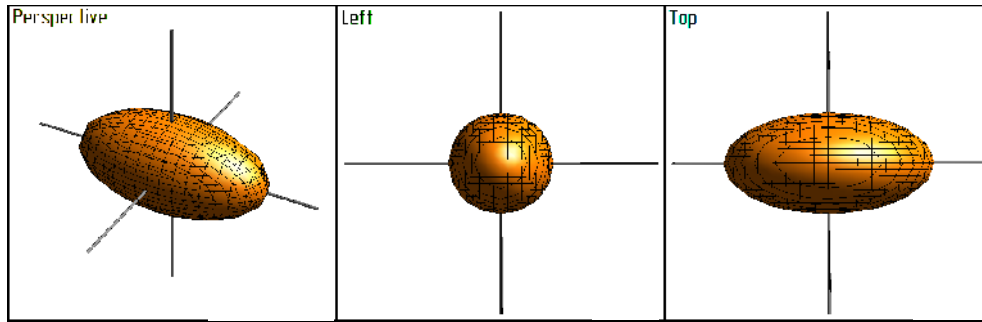


Рисунок 2 - Схематичне зображення еліпсоїдальної ємності продовгуватої форми

Таким чином, для підвищення технологічності конструкції, економії металу, зручності виготовлення і збереження достатньої міцності, доцільно використовувати еліпсоїдальні ємності та днища сплюсненої форми, у яких співвідношення більшої півосі до меншої знаходиться у межах 3,5 (рис. 3).

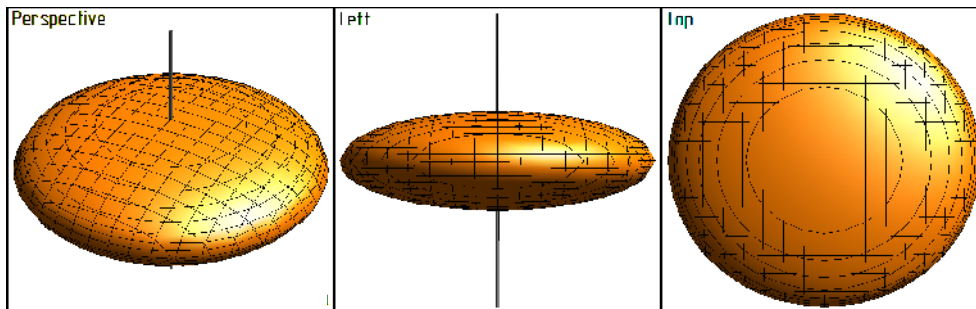


Рисунок 3 - Схематичне зображення еліпсоїдальної ємності сплюсненої форми

До речі, перевага еліпсоїдальної форми при товстій стінці побічно підтверджується і природою. Наприклад, лівий шлуночок серця всіх живих істот - товстостінний еліпсоїд (рис. 2). У практично здорових людей співвідношення більшої і меншої осей порожнини шлуночка дорівнює 1,7.

#### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Необхідність розроблення математичної моделі напружено-деформованого стану товстостінних еліпсоїдальних оболонок привела до розроблення відповідного розділу теорії пружності [1]. Проте ця теорія виявилася досить складною, і член-кореспондент НАН України Улитко А. Ф. додатково розглянув її у сенсі прикладних задач [2-3]. Однак і розробки академіка не дають можливості використовувати їх в інженерній практиці фахівцями, які не мають спеціальної математичної підготовки.

Перед авторами постала мета розробити математичну модель напружено-деформованого стану товстостінного еліпсоїда обертання сплюсненої форми у вигляді днища (рис. 3), навантаженого внутрішнім тиском, придатну для програмної реалізації, та за допомогою цієї програми розраховувати напруження на персональному комп'ютері.

#### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розроблення алгоритму починається з визначення ключових величин:  
Позначимо:

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  
 $a_1, b_1$  – менша і більша півосі внутрішньої порожнини еліпсоїда відповідно.

Визначимо:

$$c_1 = \sqrt{b_1^2 - a_1^2},$$

де  $c_1$  – половина міжфокусної відстані внутрішньої порожнини еліпсоїда.

Задамо:

$$c_1 = c_2,$$

де  $c_2$  – половина міжфокусного відстані зовнішньої поверхні еліпсоїда.

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \operatorname{arcsch}(b_1/c_1); \\ \mu_1 &= \operatorname{sh}(\xi_1); a_2 = a_1 + d; \\ \xi_2 &= \operatorname{arcch}(a_2/c_1); \\ \mu_2 &= \operatorname{sh}(\xi_2); b_2 = a_2 \cdot \operatorname{cth}(\xi_2), \end{aligned}$$

де  $\operatorname{ch}, \operatorname{sh}, \operatorname{cth}$  – гіперболічні косинус, синус, котангенс;

$a_1, a_2$ , – розміри на полюсі еліпсоїда;

$d$  – товщина стінки еліпсоїда;

$b_2$  – розмір більшої півосі зовнішньої поверхні еліпсоїда.

Маємо такі вхідні дані:

$$\xi_1, \xi_2, \mu_1, \mu_2, m = 1/\nu; \quad \eta \text{ (для полюса } \eta = \pi/2, \text{ для екватора } \eta = 0).$$

Задамо:

$$\theta = \cos \eta; \quad k = 1, 2, 3, 4, 5; \quad n = 2k-1, \text{ (тобто } n = 1, 3, 5, 7, 9).$$

Визначимо поліноми Лежандра першого роду [4]:

$$P_n(\mu_1), P_n(\mu_2), P_n^1(\theta), P_n^1(\mu_1), P_n^1(\mu_2).$$

Визначимо поліноми Лежандра другого роду [4]:

$$Q_n(\mu_1), Q_n(\mu_2), Q_n^1(\mu_1), Q_n^1(\mu_2).$$

Визначимо коефіцієнти, що відповідають  $\xi_i$ ,

де  $i = 1, 2$  (1 – внутрішня поверхня, 2 – зовнішня поверхня).

$$\beta_n(\xi_i) = \frac{P_n(\mu_i)}{P_n^{(1)}(\mu_2)} - \frac{1}{n(n+1)} \cdot \operatorname{cth} \xi_i \frac{P_n^{(1)}(\mu_1)}{P_n^{(1)}(\mu_2)};$$

$$\begin{aligned} \alpha_{1n}(\xi_i) &= \frac{1}{2(n-1)} \frac{P_n(\mu_i)}{\mu_2 P_{n-1}^{(1)}(\mu_2)} + \frac{1}{n-1} \frac{\mu_i P_{n-1}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n-1}^{(1)}(\mu_2)} - \\ &- \frac{1}{n(n-1)} \frac{(\operatorname{cth} \xi_i) \mu_i P_{n-1}^{(1)}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n-1}^{(1)}(\mu_2)} - \frac{3m-4}{2m} \frac{1}{n(n^2-1)} \frac{\operatorname{cth} \xi_i P_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n-1}^{(1)}(\mu_2)}, \end{aligned}$$

$$\alpha_{11}(\xi_i) = \frac{1}{2} \left( 3 - \frac{3m-4}{2m} \right) \frac{\mu_i}{\mu_2},$$

$$\alpha_{2n}(\xi_i) = -\frac{1}{2(n-1)} \frac{P_n(\mu_i)}{\mu_2 P_{n+1}^{(1)}(\mu_2)} + \frac{\mu_i P_{n+1}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n+1}^{(1)}(\mu_2)} -$$

$$-\frac{3m-4}{2m} \frac{1}{n(n+1)^2} \frac{cth \xi_i P_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n+1}^{(1)}(\mu_2)} - \frac{(cth \xi_i) \mu_i P_{n+1}^{(1)}(\mu_i)}{(n+1)^2 \mu_2 P_{n+1}^{(1)}(\mu_2)},$$

$$\chi_n(\xi_i) = \frac{P_n^{(1)}(\mu_i)}{P_n^{(1)}(\mu_2)},$$

$$\alpha_{3n}(\xi_i) = \frac{n+1}{n-1} \frac{\mu_i P_{n-1}^{(1)}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n-1}^{(1)}(\mu_2)} - \frac{1}{2(n-1)} \frac{P_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n-1}^{(1)}(\mu_2)},$$

$$\alpha_{11}(\xi_i) = \frac{1}{2} \left( 3 - \frac{3m-4}{2m} \right) \frac{ch \xi_i}{ch \xi_1}, \quad \alpha_{31}(\xi_i) = -\frac{1}{2} \frac{sh \xi_i}{ch \xi_1}.$$

$$\alpha_{4n}(\xi_i) = \frac{n}{n+1} \frac{\mu_i P_{n+1}^{(1)}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n+1}^{(1)}(\mu_2)} + \frac{1}{2(n+1)} \frac{P_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_2 P_{n+1}^{(1)}(\mu_2)},$$

$$\alpha_n(\xi_i) = \frac{Q_n(\mu_i)}{Q_n^{(1)}(\mu_1)} - \frac{1}{n(n+1)} (cth \xi_i) \frac{Q_n^{(1)}(\mu_i)}{Q_n^{(1)}(\mu_1)},$$

$$\gamma_{1n}(\xi_i) = \frac{1}{2(n-1)} \frac{Q_n(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n-1}^{(1)}(\mu_1)} + \frac{1}{n-1} \frac{\mu_i Q_{n-1}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n-1}^{(1)}(\mu_1)} -$$

$$-\frac{1}{n(n-1)} \frac{(cth \xi_i) \mu_i Q_{n-1}^{(1)}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n-1}^{(1)}(\mu_1)} - \frac{3m-4}{2m} \frac{1}{n(n^2-1)} \frac{cth \xi_i Q_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n-1}^{(1)}(\mu_1)},$$

$$\alpha_{11}(\xi_i) = \frac{1}{2} \left( 3 - \frac{3m-4}{2m} \right) \frac{\mu_i}{\mu_2},$$

$$\gamma_{2n}(\xi_i) = -\frac{1}{2(n-1)} \frac{Q_n(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n+1}^{(1)}(\mu_1)} + \frac{\mu_i Q_{n+1}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n+1}^{(1)}(\mu_1)} -$$

$$-\frac{3m-4}{2m} \frac{1}{n(n+1)^2} \frac{(cth \xi_i) Q_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n+1}^{(1)}(\mu_1)} - \frac{(cth \xi_i) \mu_i Q_{n+1}^{(1)}(\mu_i)}{(n+1)^2 \mu_1 Q_{n+1}^{(1)}(\mu_1)},$$

$$\gamma_{3n}(\xi_i) = \frac{n+1}{n-1} \frac{\mu_i Q_{n-1}^{(1)}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n-1}^{(1)}(\mu_1)} - \frac{1}{2(n-1)} \frac{Q_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n-1}^{(1)}(\mu_1)},$$

$$\gamma_{31}(\xi_i) = -\frac{1}{2} \frac{sh \xi_i}{\mu_1}.$$

$$\gamma_n(\xi_i) = \frac{Q_n^{(1)}(\mu_i)}{Q_n^{(1)}(\mu_1)},$$

$$\gamma_{4n}(\xi_i) = \frac{n}{n+1} \frac{\mu_i Q_{n+1}^{(1)}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n+1}^{(1)}(\mu_1)} + \frac{1}{2(n+1)} \frac{Q_n^{(1)}(\mu_i)}{\mu_1 Q_{n+1}^{(1)}(\mu_1)}.$$

Складемо систему з 16 рівнянь (8 пар) при  $k = 2, 3, 4, 5$ , тобто  $n = 2k-1$ , і  $\xi_i = 1, 2$  (8 рівнянь при  $\xi_i=1$ ; 8 рівнянь при  $\xi_i=2$ ):

$$\beta_n(\xi_i)\overline{B}_n - \alpha_{1n}(\xi_i)\overline{A}_{n-1} - \alpha_{2n}(\xi_i)\overline{A}_{n+1} + \delta_n(\xi_i)\overline{D}_n - \gamma_{1n}(\xi_i)\overline{C}_{n-1} - \gamma_{2n}(\xi_i)\overline{C}_{n+1} = 0,$$

$$\chi_n(\xi_i)\overline{B}_n - \alpha_{3n}(\xi_i)\overline{A}_{n-1} - \alpha_{4n}(\xi_i)\overline{A}_{n+1} + \nu_n(\xi_i)\overline{D}_n - \gamma_{3n}(\xi_i)\overline{C}_{n-1} - \gamma_{4n}(\xi_i)\overline{C}_{n+1} = 0.$$

Додамо 4 рівняння для випадку  $k=1$ , тобто  $n=1$ .

Для внутрішньої поверхні (для  $n=1$ ):

$$\beta_1(\xi_1)\overline{B}_1 - \alpha_{11}(\xi_1)\overline{A}_0 - \alpha_{21}(\xi_1)\overline{A}_2 + \delta_1(\xi_1)\overline{D}_1 - \gamma_{11}(\xi_1)\overline{C}_0 - \gamma_{21}(\xi_1)\overline{C}_2 = \mu_1,$$

$$\chi_1(\xi_1)\overline{B}_1 - \alpha_{31}(\xi_1)\overline{A}_0 - \alpha_{41}(\xi_1)\overline{A}_2 + \nu_1(\xi_1)\overline{D}_1 - \gamma_{31}(\xi_1)\overline{C}_0 - \gamma_{41}(\xi_1)\overline{C}_2 = -sh(\xi_1).$$

Для зовнішньої поверхні (для  $n=2$ ):

$$\beta_1(\xi_2)\overline{B}_1 - \alpha_{11}(\xi_2)\overline{A}_0 - \alpha_{21}(\xi_2)\overline{A}_2 + \delta_1(\xi_2)\overline{D}_1 - \gamma_{11}(\xi_2)\overline{C}_0 - \gamma_{21}(\xi_2)\overline{C}_2 = 0,$$

$$\chi_1(\xi_2)\overline{B}_1 - \alpha_{31}(\xi_2)\overline{A}_0 - \alpha_{41}(\xi_2)\overline{A}_2 + \nu_1(\xi_2)\overline{D}_1 - \gamma_{31}(\xi_2)\overline{C}_0 - \gamma_{41}(\xi_2)\overline{C}_2 = 0.$$

Маємо 20 рівнянь з 22 невідомими:

$\overline{B}_1, B_3, B_5, B_7, B_9, \overline{D}_1, D_3, D_5, D_7, D_9, \overline{A}_0, A_2, A_4, A_6, A_8, A_{10}=0, \overline{C}_0=0, C_2, C_4, C_6, C_8, C_{10}$ .

Щоб таку систему розв'язати, додамо ще 2 рівняння-тотожності, які відображають умови  $\overline{A}_{10}=0, \overline{C}_0=0$ .

Тоді матриця коефіцієнтів при перемінних  $\overline{B}_i, \overline{D}_i, \overline{A}_i, \overline{C}_i$  буде подана у вигляді таблиці.

Систему з 22 рівнянь розв'язуємо методом Гаусса.

Визначимо:

$$A_n = \left[ n\mu_2 P_n^{(1)}(\mu_2) \right]^{-1} \overline{A}_n,$$

$$B_n = \left[ (2n+1)P_n^{(1)}(\mu_2) \right]^{-1} \overline{B}_n,$$

$$C_n = \left[ n\mu_1 Q_n^{(1)}(\mu_1) \right]^{-1} \overline{C}_n,$$

$$D_n = \left[ (2n+1)Q_n^{(1)}(\mu_1) \right]^{-1} \overline{D}_n.$$

Визначимо  $V_{\text{роз}}$ :

$$D_0 = 0;$$

$$A_0 = (\mu_2)^{-1} \overline{A}_0;$$

$$V_{\rho\sigma} = \sum_{n=1}^{n=9} \frac{1}{n(n+1)} \left\{ (2n+1)B_n P_n^{(1)}(\mu_1) + (2n+1)D_n Q_n^{(1)} \times \right. \\ \times (\mu_1) - A_{n-1} \left[ (n+1)\mu_1 P_{n-1}^{(1)}(\mu_1) + \frac{3m-4}{2m} P_n^{(1)}(\mu_1) \right] - \\ - A_{n+1} \left[ n\mu_1 P_{n+1}^{(1)}(\mu_1) - \frac{3m-4}{2m} P_n^{(1)}(\mu_1) \right] - \\ - C_{n-1} \left[ (n+1)\mu_1 Q_{n-1}^{(1)}(\mu_1) + \frac{3m-4}{2m} Q_n^{(1)}(\mu_1) \right] - \\ \left. - C_{n+1} \left[ n\mu_1 Q_{n+1}^{(1)}(\mu_1) - \frac{3m-4}{2m} Q_n^{(1)}(\mu_1) \right] \right\} P_n^{(1)}(\theta).$$

$$\bar{V}_{\rho\sigma} = V_{\rho\sigma}$$

(в Улитка [3]  $\bar{V}_{\rho\sigma} = U_r$  див. с. 221).

Знаходимо відносно об'ємну деформацію:

$$\bar{\theta} = \sum_{n=0}^{n=\infty} (2n+1) [A_n P_n(ch\xi) + C_n Q_n(ch\xi)] P_n(\cos\eta).$$

Після чого знаходимо для внутрішньої поверхні (при  $\xi = \xi_1$ ):

$$R = ch \xi_1; \quad Z = -sh \xi_1;$$

$$\sin \alpha = \frac{sh \xi_1 \cos \eta}{\sqrt{sh^2 \xi_1 + \sin^2 \eta}}; \quad \cos \alpha = \frac{ch \xi_1 \sin \eta}{\sqrt{sh^2 \xi_1 + \sin^2 \eta}}.$$

Нормальні до поверхні еліпсоїда напруги:  $\sigma_\xi = -R \cos \alpha + Z \sin \alpha$ ;

$$e_\phi = \frac{V_{расч}}{sh \xi_1 \cdot \sin \eta}.$$

Для випадку  $\eta > 0$ .

Кільцеві напруження:

$$\sigma_\eta = \frac{m \cdot \theta}{(m-2)m} + e_\phi;$$

$$\sigma_\eta = \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \frac{m}{(m-2)} \theta - (\sigma_{\xi_1} + \sigma_\phi).$$

Для випадку  $\eta = 0$ :

Меридіональні напруження:

$$\sigma_\phi = \sigma_\eta = \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \left( \frac{m}{(m-2)} \right) \bar{\theta}.$$

Аналогічно визначаємо для зовнішньої поверхні, але при цьому  $R=0$ ,  $Z=0$ ,  $\xi = \xi_2$ .

Запропонований нами розрахунок і алгоритм – програмно реалізовані. В табл. 1 наведені розраховані на комп'ютері градієнти напружень (величина напружень на одиницю внутрішнього тиску). Картина розподілених цих напружень у сплюсненому товстостінному еліпсоїді обертання зі співвідношенням осей, близьким до 3,5, оптимальним для еліпсоїдального днища емностей (як у реально існуючого реактора ВВЕР-1000), показана на рис. 4.

Таблиця 1 – Вихідні дані при розрахунку напружень днища реактора ВВЕР-1000

	$\mu_1$	$\mu_2$	$\sigma_\eta$		$\sigma_\phi$		$\sigma$		Позначки до рис. 4	
	внутр.	зовн.	внутр.	зовн.	внутр.	зовн.	внутр.	зовн.	внутр.	зовн.
1,571	1,035	1,057	8,320	6,444	4,993	4,832	-1,000	0,000	1	1
1,309	1,035	1,057	8,343	6,477	4,822	4,724	-1,000	0,000	2	2
1,047	1,035	1,057	8,213	6,336	4,799	4,617	-1,000	0,000	3	3
0,785	1,035	1,057	8,078	6,193	4,716	4,576	-1,000	0,000	4	4
0,524	1,035	1,057	7,576	5,629	4,563	4,358	-1,000	0,000	5	5
0,262	1,035	1,057	6,632	5,014	4,519	4,287	-1,000	0,000	6	6
0,000	1,035	1,057	6,153	4,900	4,451	4,105	-1,000	0,000	7	7

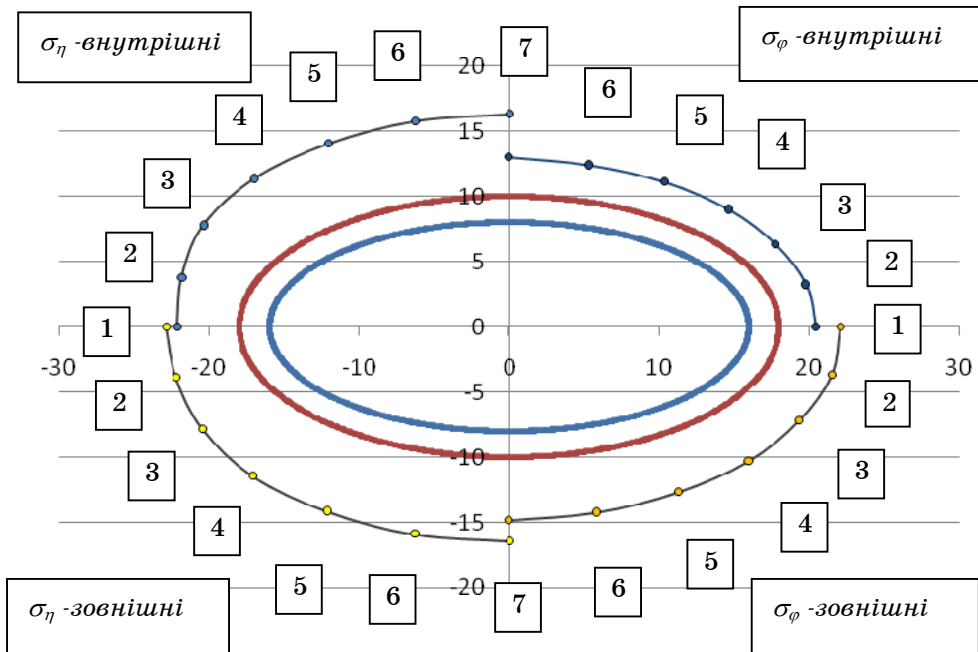


Рисунок 4 - Розподіл меридіональних ( $\sigma_\eta$ ) і кільцевих ( $\sigma_\phi$ ) напружень реактора ВВЕР-1000

### ВИСНОВКИ

Використання отриманої математичної моделі напружено-деформованого стану товстостінного еліпсоїда дозволило визначити напруження і деформації у водно-водяному енергетичному реакторі

ВВЕР-1000 (рис. 4), і зробити їх визначальними при розрахунку його на міцність. Також модель придатна для визначення граничних навантажень під час аварійних ситуацій, пов'язаних з підвищенням тиску всередині реактора. Вона дозволяє розрахувати максимальні навантаження, що не призведуть до руйнування корпусу реактора, виходячи з механічних показників сталі Х2ГНМФА, з якої виготовляється корпус реактора ВВЕР-1000. Надійність матеріалу корпусу реактора зрештою визначає ресурс реактора, а отже, й атомної станції в цілому.

Методика також придатна для розрахунків напружено-деформованого стану та граничних навантажень товстостінних еліпсоїдальних ємностей витягнутої форми.

Як показав досвід, запропонована модель має потребу в подальшому спрощенні, а саме є необхідність одержання аналітичних залежностей для еліпсоїдів, об'єднаних у групи за принципом спільності співвідношень геометричних розмірів.

## SUMMARY

### DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THICK-WALLED ELLIPSOIDAL VESSELS, WORKING UNDER PRESSURE

*Boyko V., Kucenko G., Musiyaka V., Sukhomlin V., Reyderman Yu., Nosov D.*

*A mathematical model of the state of the ellipsoidal bottom wall of ВВЭР-1000 reactor at loading its internal pressure has been offered. At that the edge condition is the absence of stresses on the outer surface and the presence on the inner surface only normal for it stress, which is equal in magnitude to the internal pressure. An algorithm for solving the model is implemented in software, which enabled a series of calculations to determine the stress-strain state of thick-walled ellipsoidal bottom, working under pressure, and to use the results to test the strength and reliability of the case.*

**Key words:** *stress-strain state, thick-walled ellipsoid, the capacity of the reactor ВВЭР-1000, mathematical model.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Volterra V. Sul problema dell'equilibrio elastico di un ellissoide di rotazione // Nota di Orazio Tedone, Presentata dal Socio, Meccanica. - Italia, 1919. - С.76-84.
2. Куценко Г. В. Теплові напруги в елементах конструкцій (Вісесиметрична деформація порожнього еліпсоїда обертання) / Г. В. Куценко, А. Ф. Улитко. – Київ: Наукова думка, 1971. - №11. - С. 37-42.
3. Улитко А. Ф. Метод власних векторних функцій у просторових задачах теорії пружності. - Київ: Наукова думка, 1979. - С. 220-227.
4. Янке Е. Таблицы функций с формулами и кривыми / Е. Янке, Ф. Эмде. - М.: Гостехиздат, 1948. - С. 205-213.

*Надійшла до редакції 28 квітня 2011 р.*