

К. Бурак\*, М. Гринішак\*, В. Михайлишин\*, О. Шпаківський\*\*  
 \*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
 \*\*ВП "Рівненська АЕС" НАЕК "Енергоатом"

## РЕЗУЛЬТАТИ ГЕОДЕЗИЧНОГО КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗОРВ АЕС З ВВЕР-1000

© Бурак К.О., Гринішак М.Я., Михайлишин В.П., Шпаківський О.П., 2011

*На конкретном примере за результатами геодезического контроля геометрических параметров ЗОРВ оценено влияние работ по натяжению арматурных пучков на напряженно-деформированное состояние, подтвердившее эффективность геодезических работ в общем комплексе мероприятий по обеспечению эксплуатационной надежности ЗОРВ АЭС с ВВЭР-1000.*

*On case example for the results of the geodesic control of geometric parameters ZORO is appreciated the influence of works as to pull of armatures bunches on tensely-deformed state acknowledging the effectiveness of geodesic works generally program as to ensuring of operational reliability RB APS with WWER-1000.*

**Постановка проблеми.** Нормативними документами з ядерної безпеки експлуатація блоків АЕС допускається тільки у разі контролю за напружено-деформованим станом захисної оболонки реакторних відділень (ЗОРВ), які є останнім бар'єром на шляху розповсюдження радіаційного забруднення під час аварій. Геодезичний контроль геометричних параметрів ЗОРВ дозволяє визначити величини векторів переміщень точок оболонки і за цими даними знайти компоненти тензорів деформацій та напружень. У статті на реальному прикладі аналізу результатів геодезичного контролю на одній з АЕС України наочно продемонструємо можливості геодезичного контролю в загальному комплексі робіт з забезпечення експлуатаційної надійності.

**Постановка завдання.** За теоретичними викладеннями, детально описаними в [2], доведемо до координатного вигляду вирішення, яке дозволяє оцінити міру загрози експлуатаційній надійності захисної оболонки реакторного відділення (ЗОРВ), виявлених за результатами вимірювань геодезичними методами в мікротрилатераційних сітках РВ, значень радіальних деформацій. Методика цих вимірів детально описана в [3]. Одержане вирішення дозволяє значно розширити можливості застосування результатів геодезичних вимірів і робить рентабельним використання під час їх виконання сучасних електронних тахеометрів субміліметрової точності.

**Виклад матеріалу.** Теоретичне вирішення проблеми наведено в [2] і полягає в тому, що для часткового випадку, коли у циліндричній системі координат відомий вектор переміщень  $W=(W_1;W_2;W_3)$ , діє припущення, що  $W_1=W(\theta)$ ,  $W_2=0$ ,  $W_3=0$ , для розрахунку напружень використовують закон Гука [4]:

$$p^{ij} = \lambda g_{ij} W / r + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

де  $\lambda$ ,  $\mu$  – параметри Ламе, пов'язані з модулем пружності Юнга –  $E$  та коефіцієнтом Пуассона –  $\sigma$  залежностями

$$\lambda = \sigma E / ((1 + \sigma)(1 - 2\sigma)) \quad (2)$$

$$\mu = E / 2(1 + \sigma) \quad (3)$$

$$E = \mu(3\lambda + 2\mu) / (\lambda + \mu) \quad (4)$$

$$\sigma = \lambda / 2(\lambda + \mu) \quad (5)$$

для підрахунку тензора деформацій використано коваріантне диференціювання вектора  $W$ , яке виконується за формулами

$$\nabla_i W^j = \partial W^j / \partial x_i - \sum_{\alpha=1}^3 W_\alpha \Gamma_{ji}^\alpha, \quad (6)$$

де  $\Gamma_{ji}^\alpha$  – символи Кристоффеля, які в циліндричній системі координат дорівнюють

$$\Gamma_{22}^1 = -r; \quad \Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = 1/r;$$

решта  $\Gamma_{ji}^\alpha = 0$ . Звідси для компонентів тензора деформацій одержано

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} = \nabla_1 W_1 = 0; \quad \varepsilon_{12} = 0,5 \partial W / \partial \theta = \varepsilon_{21} \\ \varepsilon_{22} = \nabla_2 W_2 = W/r; \\ \varepsilon_{13} = \varepsilon_{33} = \varepsilon_{23} = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

Величина першого інваріанта тензора деформацій визначиться з виразу

$$I_1(\varepsilon) = \varepsilon_{ij} g_{ij} = \sum_{i,j=1}^3 \varepsilon_{ij} g_{ij}, \quad (8)$$

де  $g_{ij}$  – компоненти матриці, оберненої до матриці

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

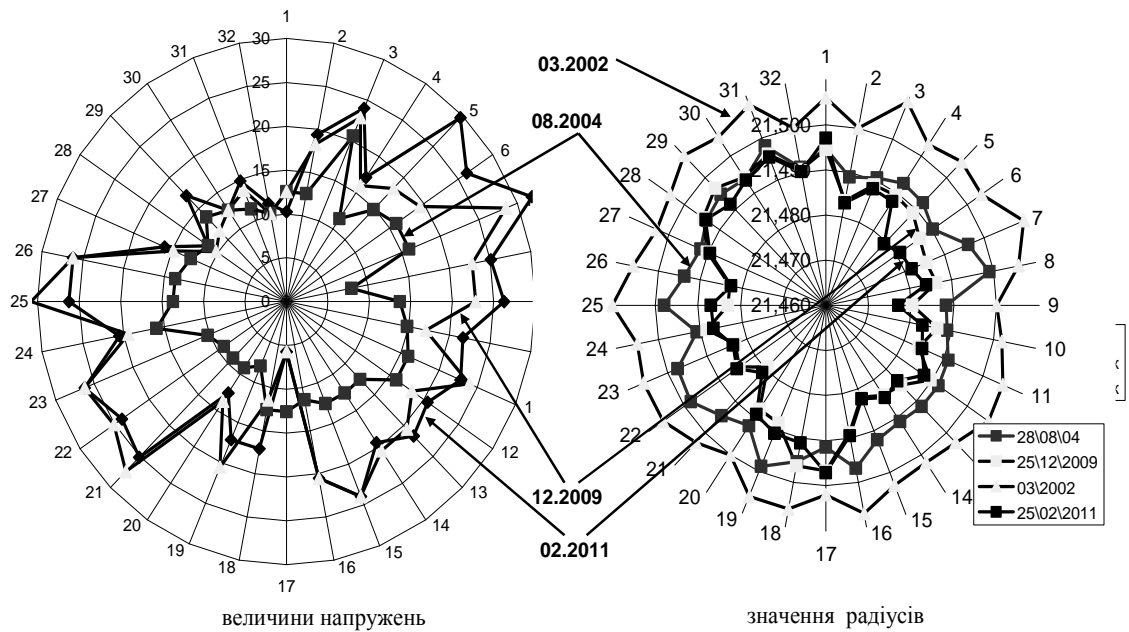
Звідси, після деяких перетворень, одержимо

$$I_1(\varepsilon) = W/r \quad (9)$$

Після перетворень, формули для розрахунку фізичних компонент тензора напружень можемо подати у вигляді

$$\begin{aligned} P^{rr} &= \lambda W/r - P^{\theta\theta} = (\lambda + 2\mu)W/r \\ P^{zz} &= \lambda W/r - P^{\theta\theta} = (\mu \partial W / \partial \theta)/r \\ P^{rz} &= P^{\theta z} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

На рисунку наведені результати визначення радіусів ЗОРВ і напружень, які вираховували за координатами точок мережі мікротрилатерації, закріплених на круговій колії полярного крана реакторного відділення. Методика визначення радіусів описана в [1]. Для аналізу зміни напружено-деформованого стану вибрано чотири характерні серії спостережень. 1-ша серія – 03.2002 р. після монтажу всіх будівельних конструкцій. 2-га серія - 28.08.2004 року після натягу арматурних пучків захисної оболонки реакторного відділення до зусиль  $8,7 \times 10^3$  кН. 3-тя серія – 12.2009 р і 4-та серія – 02.2011 р. За період 2009 – 2011 рр., проводились тільки роботи з заміни датчиків натягу арматурних пучків. Під час цих робіт зусилля натягу (по одному пучку протягом одного дня) мінялось від 0 до відновлення нормативної величини. Всього замінили датчики на 20 пучках. Тобто визначені за результатами вимірювань радіальної складової векторів переміщень точок гермооболонки за період між 2002 – 2004 рр. компоненти тензора деформацій характеризують зміну напружено-деформованого стану, спричинену натягом арматурних пучків до зусиль  $8,7 \times 10^3$  кН. За період 2009–2011 рр. релаксацією пучків, температурними деформаціями, роботами з контролю натягу. Результати підрахунку найзначущої компоненти  $P^{\theta\theta}$  також показані на діаграмі на рисунку під час розрахунків приймали значення модуля Юнга  $2,43 \times 10^{10}$  Па і коефіцієнт Пуассона – 0,15. Аналіз результатів показує, що найбільші деформації і напруження збігаються з напрямком осі  $\Pi - Y$  і в результаті натягу до зусиль  $8,7 \times 10^3$  кН перебували в діапазоні від -8,0 МПа до -20,5 МПа, за результатами вимірювань 12.2009 р в діапазоні від -5,7 МПа до -30,8 МПа і на 02.2011 залишились практично такими самими в діапазоні від -0,5 МПа до -30,9 МПа. Звичайно точність одержаного рішення залежить від точності, з якою ми знаємо значення модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона, але, якщо порівняти одержані значення з, наприклад, модулем текучості сталі 420 МПа, то можна зробити висновок, що загрози експлуатаційній надійності ЗОРВ виявлені деформації не несуть. Але, якщо проаналізувати зміни геометричних параметрів оболонки, то варто відзначити значне погіршення геометричних параметрів колії, яке негативно впливає на експлуатаційну надійність роботи вантажопідіймальних механізмів. Тому, з погляду забезпечення їх ефективної експлуатації, треба або зменшувати зусилля натягу, або під час будівництва нових блоків зміцнювати будівельні конструкції, наприклад, замість окремих консолей, розміщати колію на суцільному бетонному консольному кільці.



Результати визначення деформацій та напружень ЗОРВ

**Висновки.** Геодезичний контроль геометричних параметрів гермоболонки реакторного відділення під час монтажу і в експлуатаційний період дозволив встановити величини змін напружено-деформованого стану ЗОРВ, ступінь їх загрози експлуатаційній надійності, зокрема встановити, що під час натягу пучків до граничної проектної величини  $8,7 \times 10^3$  кН відбуваються значні зміни геометричних параметрів підкранових колій полярного крана реакторного відділення, які негативно впливають на ефективність його використання.

1. Бурак К.Е., Шпакивский П.П., Малов В.П. Геодезические работы для расчета рихтовки пути полярных кранов АЭС // Геодезия и картография. – М., 1996. – №12. – С. 22–25. 2. Бурак К.О. Про можливість виділення критичних напружено-деформованих зон ЗОРВ АЕС за результатами геодезичних вимірів // Вісник геодезії і картографії. – 1999. – №1. – С.14. 3. Методичний посібник організації комплексних досліджень на геодинамічних полігонах України. Розділ 5. Геодезичний моніторинг / Островський А.Л., Бурак К.Е., Заблоцький Ф.Д., Черняга П.Г., Третяк К.Р. – Львів, 1998. – 58 с. 4. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1973. – 536 с.

Надійшла 16.04.2011 р.