

korotkozamknutykh rotorov asinkhronnykh elektroprivodov elektrotekhnicheskikh kompleksov. DonNTU, Donetsk. **15.** Ipatov, P. M., Dombrovskiy, V. V., Tsirlin, YU. L. (1962). Vitkovyye zamykaniya v petlevykh obmotkakh asinkhronnykh mashin. Vestnik elektropromyshlennosti, 7, 36–43. **16.** Meshgin, H., Milimonfared, J. (2002). Effect of air-gap eccentricity on the power factor of squirrel cage induction machines. International conference on electrical machines. Old St. Jan Conference Center, Brugge, Belgium. Conference Record. **17.** Rogozin, G. G., Mironenko, I. A. (2000). Vliyaniye neravnomernosti vozduzhnogo zazora na elektromagnitnyye parametry i perekhodnyye protsessy rotora pri otklyuchenii asinkhronnykh dvigateley. Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. Seriya: elektrotekhnika i energetika, 17, 158–164.

*Надійшла (received) 25.05.2014*

**УДК 64.04:658.52**

**О. В. ГОНДЛЯХ**, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Київ;

**В. Ю. ОНОПРИЄНКО**, студент, НТУУ «КПІ», Київ;

**Р. Є. НІКІТІН**, студент, НТУУ «КПІ», Київ

## **ЕВОЛЮЦІЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ АЕС З УРАХУВАННЯМ ЗОН РУЙНУВАННЯ ВІД ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

На базі системи розрахунку на міцність АПРОКС розроблена математична модель та проведено чисельне моделювання процесів руйнування захисної оболонки АЕС в тривимірній постановці, враховуючи шари бетону з армоканатами, від впливу сейсмічних навантажень. Приведено результати чисельного моделювання зміни напружено-деформованого стану в захисній оболонці АЕС з урахуванням розриву попередньо напружених армоканатів.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, захисна оболонка АЕС, сейсмічне навантаження, армоканати, напружено-деформований стан.

**Вступ.** Надійність експлуатації АЕС, її дієздатність в нормальних, перехідних і аварійних режимах, працездатність допоміжного обладнання, що охолоджується, безпосередньо залежать від ступеня захисту АЕС в цілому. Захист виконується від усіх можливих зовнішніх факторів, таких як: землетрус, падіння літака на АЕС, ударна хвиля від вибуху, повінь, цунамі та ін. Захисна оболонка (ЗО) АЕС захищає навколишнє середовище від радіоактивного випромінювання, пожежі, вибухів які можуть виникати в наслідок аварії. Особлива увага при проектуванні контейментів приділяється питанням надійності, від чого безпосередньо залежить безпека функціонування АЕС. Це вимагає ретельного аналізу і врахування конструктивних особливостей, всебічного дослідження поведінки ЗО в аварійних ситуаціях, імовірність виникнення яких особливо збільшується при особливих динамічних впливах на споруди та обладнання станції. Напруження та деформації в оболонці в умовах аварії визначаються: внутрішнім тиском, нерівномірним полем температур при стаціонарних та аварійних режимах роботи, можливих сейсмічних впливів, як на конструкцію в цілому так і на окремі частини обладнання.

Експериментальний підхід (моделювання на маломасштабних моделях, натурні випробування на стендах) мають декілька суттєвих недоліків. По-перше контейменти АЕС та випробувальні стенди для них є унікальними і витратними

© О. В. ГОНДЛЯХ, В. Ю. ОНОПРИЄНКО, Р. Є. НІКІТІН, 2014

виробами, і не завжди існує можливість виготовити декілька зразків і випробувальних стендів, по-друге існують технічні складності відтворення того чи іншого режиму під час експерименту, що може бути неможливим.

Землетруси відносяться до числа найбільш небезпечних стихійних лих для споруд, будівель та обладнання атомних електростанцій. Таким чином, національні та міжнародні організації мають встановити норми та вимоги до сейсмічної конструкції кожної АЕС [1-3].

Катастрофи на АЕС Фукусіма-I і Фукусіма-II в Японії навесні 2011 року показали, що традиційні методи сейсмічного аналізу захисних оболонок АЕС потребують поліпшення, особливо щодо сильних землетрусів. При розробці обчислювальних методів для сейсмічного аналізу, слід також враховувати той факт, що сейсмічні хвилі діють разом з експлуатаційними та аварійними навантаженнями. Вони повинні бути враховані при чисельному аналізі сейсмічних впливів на конструкції, що включає внутрішній тиск, власну вагу конструкцій та обладнання, нелінійну взаємодію захисної оболонки з ґрунтом. Для попередньо напружених захисних оболонок, слід також додати навантаження від натягу армоканатів.

Недостатня інформація про характеристики впливів, складність і висока вартість проведення експериментів на фізичних моделях і натурних об'єктах при оцінці міцності та надійності споруд і обладнання атомних станцій висувують на перший план розробку ефективних методів математичного моделювання: розробку уточнених математичних моделей, розробку методів і програм розрахунків на міцність оболонок та обладнання АЕС, проведення обчислювальних експериментів, тощо.

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** Хоча дослідженням, спрямованим на вирішення задач такого типу, починаючи з 1960-х років приділяється велика увага у нашій країні і за кордоном методи розрахунків у більшості випадків мають невисоку точність. Це пов'язано зі складністю механічних і теплофізичних процесів, а також з невизначеністю умов розвитку аварійних ситуацій, що не дозволяє будувати математичні моделі без багатьох спрощуючих допущень. Побудова більш точних математичних моделей можлива лише з переходом на сучасні чисельні методи розрахунку, найбільше розповсюдження з яких отримав метод скінчених елементів (МСЕ).

У загальному випадку, для математичного моделювання сейсмічного впливу на залізобетонні конструкції АЕС класичним є динамічна задача механіки деформованого твердого тіла [4]. Розроблена математична модель, що пропонується у даній праці, на відміну від відомих, дозволяє досліджувати напружено-деформований стан (НДС) оболонки, враховуючи основні чинники, що впливають на її роботу в аварійних режимах (сейсмічна хвиля та як наслідок аварії після землетрусу – розрив армоканатів).

Головною вимогою до побудови математичної моделі, була можливість отримання шуканого рішення за якомога коротший термін, тому важливе місце при її відводилося питанню вибору ефективного скінченого елемента (СЕ). Захисна оболонка являє собою складну просторову конструкції що має криволінійні обриси. Якщо описання поверхні такої конструкції робити за

допомогою класичних СЕ, то для достатньо точної апроксимації її геометрії та НДС потрібна дуже велика кількість елементів. Найбільш доцільно для опису подібної геометрії використовувати елементи криволінійного обрису, де коефіцієнти матриці жорсткості визначаються на основі співвідношень моментної схеми МСЕ [5,6]. Цей метод базується на неявному урахуванні жорстких зсувів шляхом поліпшення властивостей матриці жорсткості, яка використовується для корекції частин виразів для обчислення їх коефіцієнтів, що визначають збіжність і точність наближених значень, за рахунок часткового порушення геометричних рівнянь, що зв'язують переміщення і деформації [7]. Також, це дозволяє при задаванні границь тіла обійтися меншою кількістю елементів, тобто зменшити кількість невідомих при розв'язанні системи рівнянь, а в результаті – час вирішення задачі.

**Ціль та задачі дослідження.** Незалежно від типу реактора і особливостей експлуатації ядерних установок, що використовуються, невід'ємною їх частиною є захисні оболонки. Захисні оболонки повинні як захищати реактор від дії зовнішніх катастрофічних навантажень, так і забезпечувати захист навколишнього середовища у випадку виникнення незапланованих ситуацій, або аварій. При проектуванні обладнання атомних електростанцій необхідно приділяти велику увагу надійності і довговічності роботи захисних оболонок.

Залізобетонні попередньо напружені захисні оболонки мають такі недоліки. По-перше, недостатня надійність основних елементів оболонки - напруженої арматури (можливий розрив або втрата напруги в деякій частині цих елементів). Внаслідок можливої втрати напруги доводиться передбачати можливість контролю арматури в експлуатаційний період і можливість підтяжки пучків у разі необхідності. По-друге, поєднання навантажень від впливу зусиль попереднього обтиснення, внутрішнього тиску, температури і динамічних навантажень, використання для стінок оболонки матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, застосування різних конструктивних рішень у вигляді отворів, елементів жорсткості, що викликають концентрацію напруг, визначення часу роботи матеріалів, що зазнали пружних і пластичних деформацій і що зазнають силові дії по трьох осях. Все це перетворює розрахунок напруженого стану оболонки в складне завдання.

**Теоретичні основи визначення НДС та міцності захисних оболонок.** Як відомо, широкий вибір методів вирішення задач динаміки [8] не дозволяє виділити якийсь домінуючий метод, який би задовольняв усьому спектру вимог, запропонованих для адекватного опису різноманітних за умовами протікання процесів. У зв'язку з цим широке застосування в інженерній практиці знайшли такі методи, як: метод центральних різниць, метод Ньюмарка,  $\theta$  - метод Вілсона, метод Хоболта [9] й ін., важливе значення при виборі яких мають такі характеристики, як точність, стійкість і ефективність.

Аналіз методів чисельного інтегрування рівнянь руху [5,10,11] дозволяє судити про абсолютну стійкість таких методів, як метод Ньюмарка,  $\theta$  - метод Вілсона, метод Хоболта, причому, при порівнянні точності цих методів, похибки методу Ньюмарка, викликані штучним загасанням і подовженням періоду коливань, із збільшенням кроку ростуть повільніше, ніж в інших методах [12].

Також можна відзначити, що при однакових кроках за часом похибки методу Ньюмарка нижчі, ніж у методів Вілсона і Гартіна [13].

У зв'язку з тим, що конструкція представляє собою багатошарову систему та її руйнування (рис. 1, а – г). В ній навіть однорідні шари в процесі руйнування можуть перетворитися в багатошарові тому використовуються основні положення ітераційно-аналітичної теорії.

Для опису НДС в конструкції використовується восьми вузловий криволінійний скінченний елемент з полілінійним законом

доповнення функцій переміщень. Побудова матриці жорсткості уточненого восьми вузлового СЕ виконується відповідно до загальної процедури моментної схеми скінченних елементів, розробленої професором О.С. Сахаровим [14].

Використовуючи варіаційний принцип і наслідуючи традиційну для МССЕ процедуру, отримуємо вирази для варіацій енергії деформацій і кінетичної енергії СЕ:

$$\delta W_{CE} = \sum_{r=1}^8 \sum_{t=1}^8 [g_{rt}^{t'p'} + \tilde{g}_{rt}^{t'p'}] u_{t'}^{(r)} \delta u_{p'}^{(t)} = \sum_{r=1}^8 \sum_{t=1}^8 [G_{rt}^{t'p'}] u_{t'}^{(r)} \delta u_{p'}^{(t)}; \quad (1)$$

$$\delta K_{CE} = \sum_{r=1}^8 \sum_{t=1}^8 [m_{rt}^{t'p'} + \tilde{m}_{rt}^{t'p'}] \ddot{u}_{t'}^{(r)} \delta u_{p'}^{(t)} = \sum_{r=1}^8 \sum_{t=1}^8 [M_{rt}^{t'p'}] \ddot{u}_{t'}^{(r)} \delta u_{p'}^{(t)}; \quad (2)$$

Розроблений уточнений восьмивузловий багатошаровий скінченний елемент має відмінну особливість: до  $g_{rt}^{t'p'}$  в (1) - коефіцієнти матриці жорсткості СЕ з полілінійним законом розподілу функцій переміщень із врахуванням МССЕ, додаються  $\tilde{g}_{rt}^{t'p'}$  — додаткові коефіцієнти матриці жорсткості уточненого СЕ, що враховують вплив неоднорідності розподілу деформацій поперечного зсуву й обтиснення; та  $m_{rt}^{t'p'}$  в (2) - коефіцієнти матриці мас СЕ з полілінійним законом розподілу функцій переміщень, що враховують інерцію від поступального руху СЕ й інерцію СЕ від узагальненого зсуву, додаються  $\tilde{m}_{rt}^{t'p'}$  — коефіцієнти матриці мас СЕ, що враховують інерцію, викликану неоднорідністю деформацій поперечного зсуву й обтиснення;  $G_{rt}^{t'p'}$  — коефіцієнти матриці жорсткості уточненого СЕ;  $M_{rt}^{t'p'}$  — коефіцієнти матриці мас уточненого СЕ [15].

Цей СЕ був розроблений у системі Автоматизації розрахунків на міцність оболонкових і комбінованих систем АПРОКС. Практика використання цього СЕ при розв'язанні великої кількості тестових і прикладних задач засвідчила його ефективність при дослідженні процесів нелінійного деформування і руйнування однорідних по товщині і багатошарових просторових конструкцій.

В зв'язку з тим, що при деформуванні в конструкціях оболонки можуть

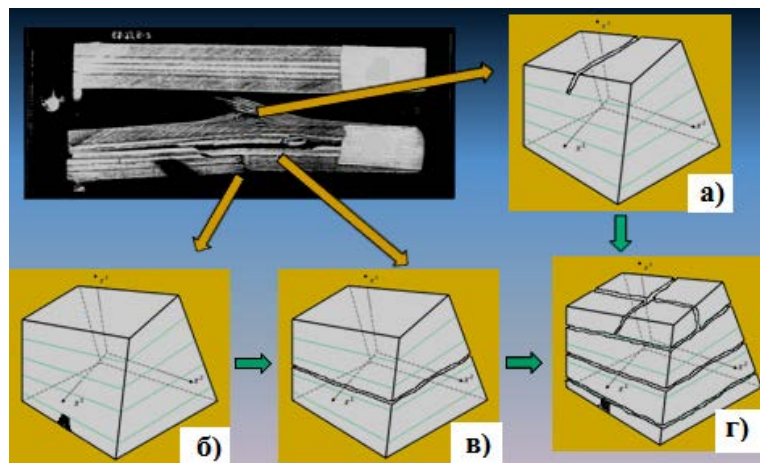


Рис. 1 – Схеми руйнування багатошарового КЕ: а – розрив шару; б – зминання шару; в – зрушення шару; г – зруйнований шар

виникати зони руйнування - використовувалась ітераційно-аналітична корекція функцій апроксимації компонент вектора переміщення SE в залежності від фізично нелінійних процесів, які протікають в шарах матеріалу при деформуванні конструкції (рис. 2).

В першому випадку - апроксимуючі функції SE знаходяться у вихідному стані матеріалу шарів (рис. 2, а). В другому випадку апроксимуючі функції SE при виникненні пластичних зон деформування в шарах (рис. 2, б); В останньому - апроксимуючі функції SE при виникненні зон руйнування в шарах (рис. 2, в).

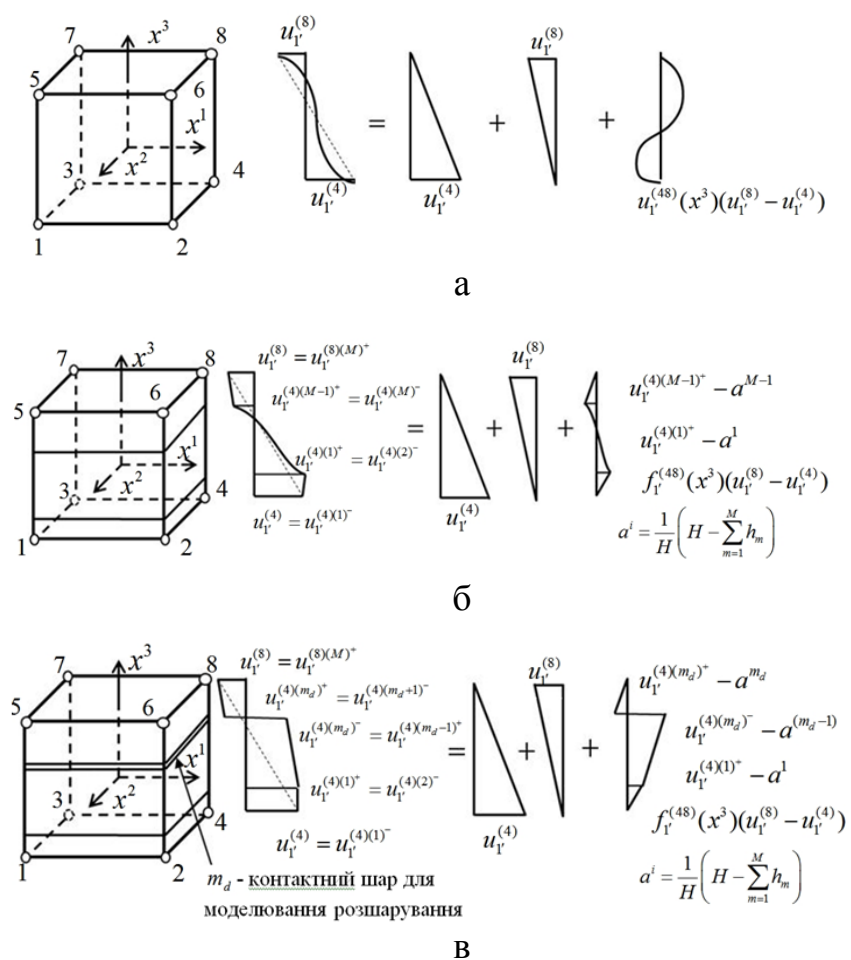


Рис. 2 – Апроксимація компонент вектора переміщень: а – однорідного по товщині уточненого восьмивузлового SE; б – багат шарового уточненого восьмивузлового SE; ( $h_m$  - товщина  $m$ -го шару;  $H$  - загальна товщина пакета шарів); в – багат шарового уточненого восьмивузлового SE в разі розшарування з урахуванням тертя; ( $h_m$  - товщина  $m$  - го шару;  $H$  - загальна товщина пакета шарів)

**Числовий аналіз міцності захисної оболонки.** Апробація розробленої математичної моделі захисної оболонки виконувалася в рамках програмного комплексу розрахунків на міцність АПРОКС, який був допрацьований з метою підвищення ефективності процесу задання вихідних даних для розрахунків складних просторових конструкцій та забезпечення можливості візуалізації скінчено-елементної моделі та задання параметрів динамічного навантаження.

На (рис. 3) представлено етапи розробки моделі захисної оболонки: а) скінчено-елементна модель; б) схема розташування армоканатів в місці гермопроходки; в) та характерна акселерограма землетрусу.

В результаті чисельного моделювання було виявлено напружено-деформований стан, що виникає в захисній оболонці від дії сейсмічного навантаження в різні моменти часу (рис. 4): а) момент поштовху; б) вертикальний рух хвилі; в) концентрація напружень в місцях гермопроходок; г) концентрація

напружень в місцях технологічних каналів.

Аналіз НДС оболонки при її динамічній деформації свідчить про те, що хвиля землетрусу направляється вертикально, після чого вона відбивається на куполі.

Далі розповсюджується по всій конструкції.

В результаті аналізу чисельного моделювання було виявлено максимальні головні напруження в захисній оболонці за умов розриву двох канатів, розташованих «хрест на хрест» (рис. 5, а) та двох канатів, розташованих паралельно один одному (рис 5, г), за якими

виявлено можливі зони руйнування (рис. 5 б, в) в наслідок дії горизонтальної сейсмічної хвилі упродовж 20 секунд.

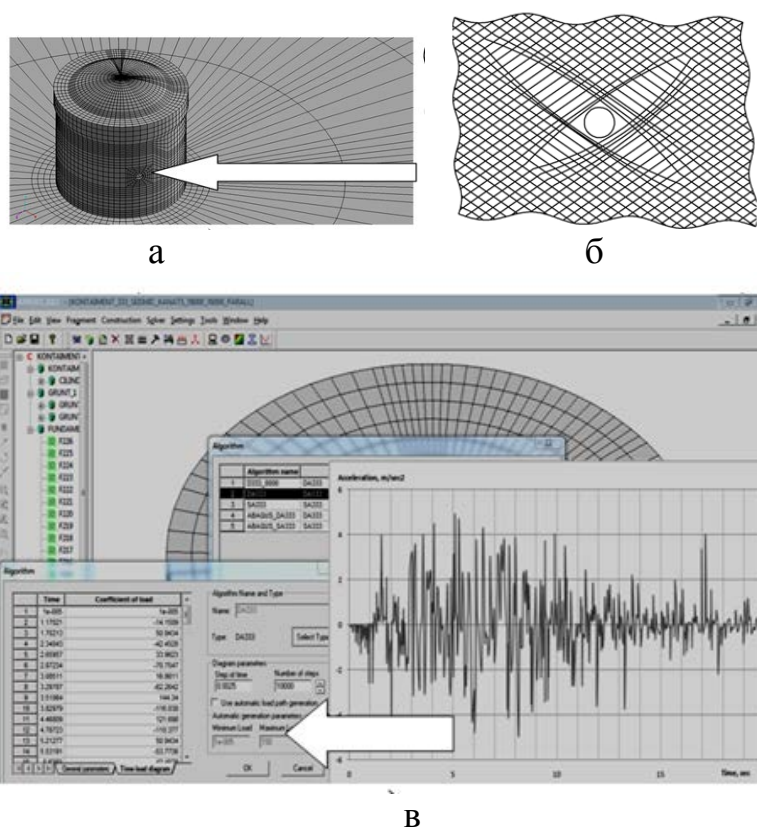


Рис. 3 - Розробка моделі захисної оболонки АЕС: а – скінчено-елементна модель; б – розташування армоканатів в зоні гермопроходки; в – акселерограма землетрусу

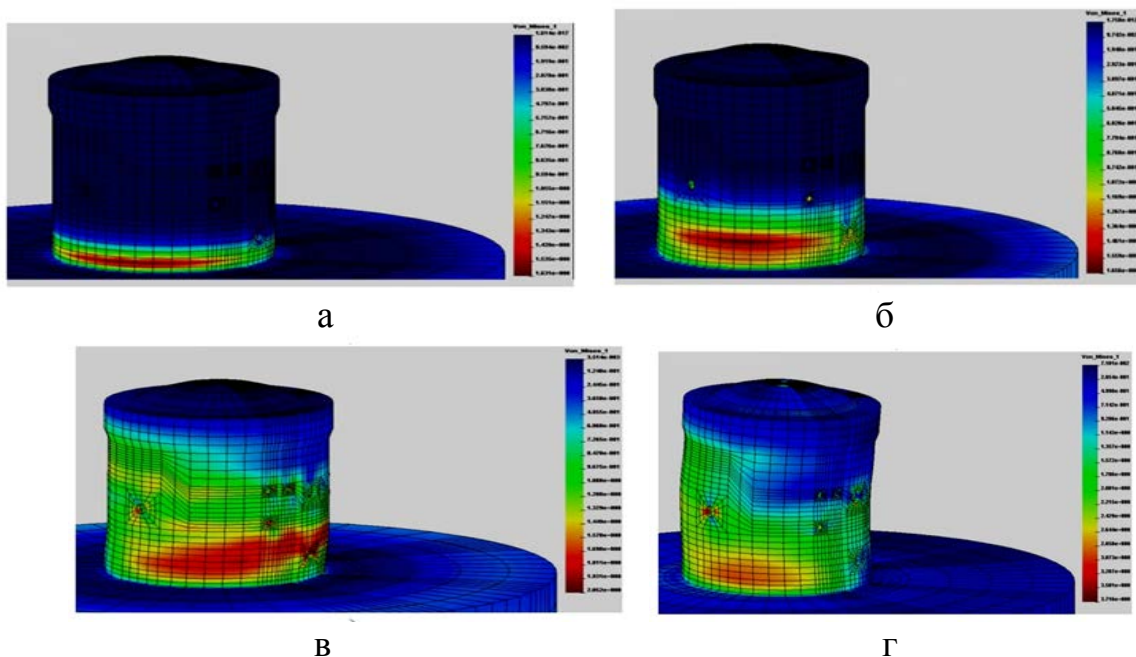


Рис. 4 – Напружено-деформований стан, що виникає в захисній оболонці від дії сейсмічних навантажень в різні моменти часу: а – 1 сек.; б – 5 сек.; в – 10 сек.; г – 20 сек

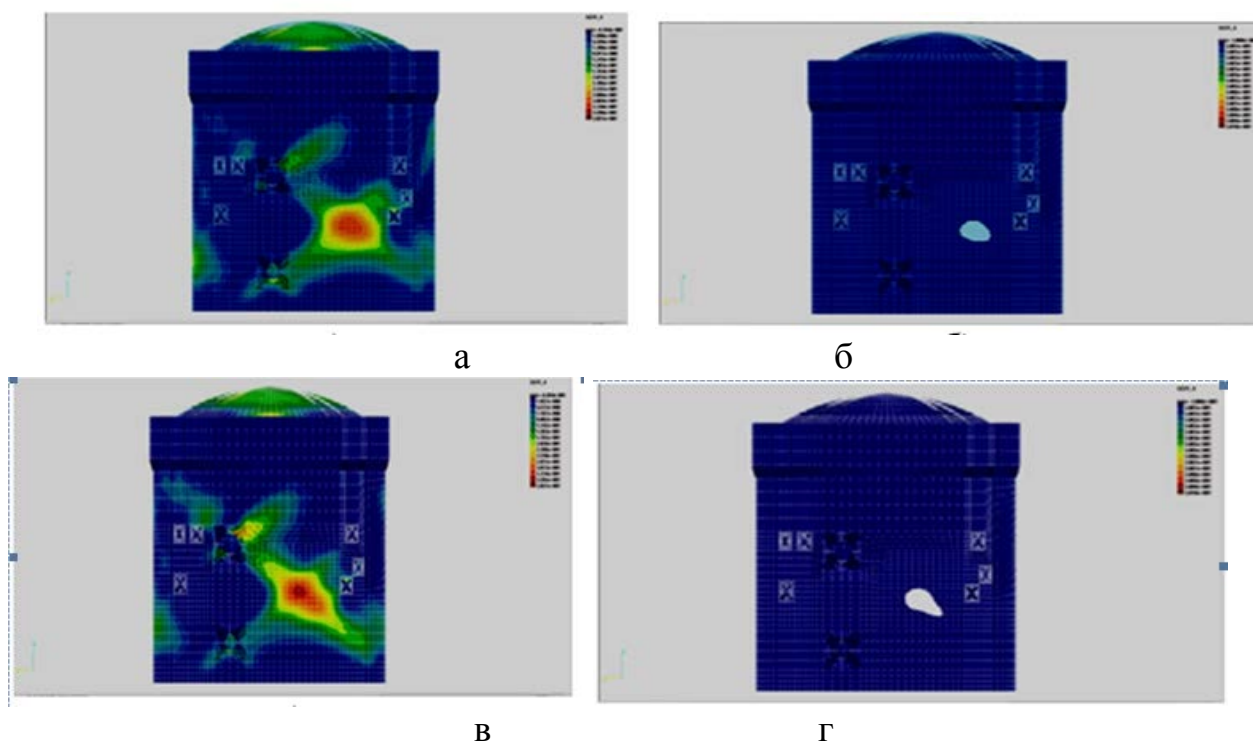


Рис. 5 – Результати розрахунку: а – максимальні головні напруження в ЗО (розрив двох канатів розташованих «хрест на хрест»); б – максимальні головні напруження в ЗО (розрив двох канатів розташованих паралельно один одному); в – зона руйнування в ЗО (розрив двох канатів розташованих «хрест на хрест»); г – зона руйнування в ЗО (розрив двох канатів розташованих паралельно один одному)

**Висновки.** На базі розрахунків можна зробити попередній висновок про сейсмостійкості аналогічних конструкцій. Від них напряму залежить безпека експлуатації обладнання АЕС.

Аналіз результатів розрахунку на міцність захисної оболонки показав, що під час землетрусу контейнер перебуває у складному напружено-деформований стан. У місці різкої зміни форми та конфігурації утворюються зони концентрації напружень.

В місцях розриву канатів утворюються локальні зони руйнування.

У зв'язку з цим пропонується приділяти підвищену увагу зазначеним зонам при подальшій експлуатації цього типу захисних оболонок. Результати роботи планується впровадити в енергетичній промисловості при проектуванні та експлуатації атомних електростанцій.

**Список літератури:** 1. ASCE 4-98. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary [Text] / ASCE Standards, USA, 2000, p. 24-30. 2. GB 50011-2001. Code for Seismic Design of Buildings [Text] / National Standard of the People's Republic of China, Beijing, 2001, p. 94-101. 3. ENV 1998-1-6:2004. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, CEN, Bruxelles, 2004, p. 161-187. 4. Zienkiewicz, O. The finite element method. Vol. 2: Solid mechanics [Text]: Fifth ed. / O. Zienkiewicz, R. Taylor. – Butterworth-Heinemann: Oxford, 2000, p. 221-239. 5. Сахаров, О. С. Исследование устойчивости осесимметричных оболочек при больших перемещениях с учетом физической нелинейности [Текст] / О. С. Сахаров, А. И. Гуляев, В. Н. Кислооккий // Проблемы прочности. – 1974. – № 6. – С. 42–47. 6. Сахаров, О. С. Исследование сходимости метода конечных элементов в задачах пластин и оболочек [Текст] /

О. С. Сахаров, Н. А. Соловей // Пространственные конструкции зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1977, С. 10-15. **7.** Сахаров, О. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел [Текст] / О. С. Сахаров та ін. // К.: Вища школа, 1982, С. 214–279. **8.** Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Бате, Е. Вилсон // М.: Стройиздат, 1982,-С. 173-188. **9.** Karamanlidis, D. The Linear Acceleration Time Integration Method revisited [Text] / D. Karamanlidis. // Journal of Sound and Vibrations, 1987, 115, №3, p.379-385. **10.** Теннисон, Р. С. Приложение кубического условия прочности к анализу разрушения слоистых композитов [Текст] / Р. С. Теннисон, Г. Е. Варрам, Г. Эллиот // Прочность и разрушение композитных материалов: Зинатне, 1983, С. 127-135. **11.** Karamanlidis, D. Simple and efficient curved beam element for the linear and non-linear analysis of laminated composite structures [Text] / D. Karamanlidis // Computers and structures, 29, №4, 1988, p.623-632. **12.** Bathe, K. Stability and accuracy of direct integration methods [Text] / K. Bathe, E. Wilson // Earthquake engineering and structural dynamics, 1973, vol.1, p.283-291. **13.** Nickell, R. On the stability of approximation operators in problem of structural dynamics [Text] / R. Nickell // Int. Journal Solids Structures, 1971, 7, p.499-520. **14.** Сахаров, О. С. Модификация метода Ритца для расчета массивных тел на основе полиномиальных разложений с учетом жестких смещений [Текст] / О. С. Сахаров // Соппротивление материалов и теория сооружений. — К.: Будівельник. 1974. — № 23. — С. 47-52. **15.** Гондляр О. В. Уточнений скінченний елемент користувача для моделювання в ABAQUS процесів розшарування багатопарових конструкцій [Текст] / О. В Гондляр // Наук. вісті НТУУ "КПІ". - 2012. - № 2. - С. 114-122.

**Bibliography (transliterated):** **1.** ASCE 4-98. (2000). Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE Standards, USA, p. 24-30. **2.** GB 50011-2001 (2001). Code for Seismic Design of Buildings. National Standard of the People’s Republic of China, Beijing, p. 94-101. **3.** ENV 1998-1-6:2004 (2004). Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. CEN, Bruxelles, p. 161-187. **4.** Zienkiewicz, O., Taylor, R. (2000). The finite element method. Vol. 2: Solid mechanics. Fifth ed. Butterworth-Heinemann: Oxford, p. 221-239. **5.** Sakharov, A. S., Gulyar, A. I., Kislookii, V. N. (1974). Investigation of the stability of axisymmetric shells with large displacements, taking into account the physical nonlinearity. - Strength of Materials, 6, p. 42–47. **6.** Sakharov, A. S., Solovey, N. A. (1977). Convergence of the finite element method in problems of plates and shells. Spatial structures and buildings. Stroiizdat, Moscow, p. 10-15. **7.** Sakharov, A. S., etc. (1982). The finite element method in the mechanics of solids. K. High School, p. 214-279. **8.** Bathe, K. Wilson, E. (1982). Numerical methods of analysis and finite element method. - M: Stroyizdat, p 173-188. **9.** Karamanlidis, D. (1987). The Linear Acceleration Time Integration Method revisited. Journal of Sound and Vibrations, 115, № 3, p.379- 385. **10.** Tennyson, R. S., Warram, G. E., Elliot, G. (1983). Appendix cubic terms to the analysis of fracture strength of layered composites. Strength and fracture of composite materials, Zinatne, p.127 -135. **11.** Karamanlidis, D. (2007). A simple and efficient curved beam element for the linear and non-linear analysis of laminated composite structures. Computers and structures, 29, № 4, p.623- 632. **12.** Bathe, K., Wilson, E. (1973). Stability and accuracy of direct integration methods. Earthquake engineering and structural dynamics, vol.1, p.283- 291. **13.** Nickell, R. E. (1971). On the stability of approximation operators in problem of structural dynamics. Int. Journal Solids Structures, 7, p.499- 520. **14.** Sakharov, A. S., (1974). Modification of the Ritz method to calculate the massive bodies on the basis of polynomial expansions to meet the stringent displacement. Strength of materials and theory of structures. Budivelnik. № 23. p. 47-52. **15.** Gondlyakh, A., (2012). Refined finite element modeling for user processes in ABAQUS bundle multilayer structures. Science. news "KPI". № 2. p. 114-122.

Надійшла (received) 15.05.2014