

УДК 624.01

Баженов В.А., д-р техн. наук,
Слободян Я.О., канд. техн. наук

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗРАХУНКУ І ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ АТОМНОЇ ЕНЕРГІЇ

Постановка задачі. Необхідність застосування програмних засобів (ПЗ) для обґрунтування безпеки об'єктів використання атомної енергії виникла паралельно з активним розвитком обчислювальної техніки. У зв'язку з цим по ініціативі Адміністрації ядерного регулювання (АЯР) України була введена вимога про необхідність верифікації ПЗ.

Для вирішення поставленої задачі АЯР України та Науково-технічним центром по ядерній і радіаційній безпеці (НТЦ ЯРБ) була підготовлена вихідна інформація для проведення порівняльних розрахунків із застосуванням ПК ЛПА [1] особливо відповідальних технічних об'єктів - типових захисних оболонок АЕС України на основі вихідних даних, наведених в звіті GRS, Німеччина, проект SR 2075/5-5-1-UA-1595 "Порівняльні розрахунки для контеймента по динамічних навантаженнях у результаті внутрішніх і зовнішніх впливів для українських АЕС із ВВЕР-1000".

Захисні оболонки являються попередньо напруженими залізобетонними конструктивними системами, у процесі експлуатації яких проводяться періодичні контрольно-профілактичні роботи для підтяжки армоканатів, що компенсують утрату зусиль в армоканатах. Аналіз факторів, що викликають утрату зусиль в армоканатах, є однією з важливих проблем, що впливають на безпеку захисних оболонок. У період між контрольно-профілактичними роботами мають місце також обриви армоканатів, у зв'язку з чим необхідне обґрунтування прогнозування працездатності захисної оболонки при порушеннях у роботі системи попереднього напруження захисної оболонки.

Ефективним шляхом одержання такої інформації є застосування сучасних програмних засобів, реалізованих на основі методу скінченних елементів, для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) споруд АЕС. Рекомендовані нормативними документами методи розрахунків об'єктів АЕС, були розроблені до широкого розвитку комп'ютерних технологій і орієнтовані на інженерні методи. Застосування ефективних чисельних методів для обґрунтування безпеки експлуатації споруд АЕС

дозволяє одержати уточнені оцінки параметрів, прийнятих діючими нормативними документами.

Мета роботи – побудова просторової лінійно-пружної моделі, виконання чисельних досліджень напружено-деформованого стану типової захисної оболонки АЕС та зіставлення результатів досліджень, отриманих за допомогою програмних засобів ЛПА (НДІ автоматизованих систем в будівництві, Україна) [1] і ADINA (GRS, Німеччина).

Загальна характеристика конструкції захисних оболонок реакторних відділень ВВЕР-1000 АЕС України (рис. 1 - 3). У багаторівневій системі безпеки АЕС одну з ключових позицій займає система герметичного огороження, що забезпечує герметичну ізоляцію ядерного реактора від навколишнього середовища, а також локалізацію наслідків можливих аварій. Система герметичного огороження реакторних відділень ВВЕР-1000 є складною інженерною спорудою неоднорідної структури і містить у собі наступні елементи:

- залізобетонні конструкції захисної оболонки;
- система попереднього напруження (попередньо напружена арматура, ненапружена арматура);
- герметизоване сталеве облицювання;
- елементи, встановлені в герметичне огороження (шлюзи, люки, двері, трубопровідні комунікації, що перетинають герметичне огороження).

Основним елементом системи герметичних огорожень реакторного відділення уніфікованого енергоблоку ВВЕР-1000 АЕС є захисна оболонка з нижньою плитою, що представляє собою попередньо напружену залізобетонну конструкцію. Захисна оболонка виконана у вигляді циліндра товщиною 1.20 м і внутрішнім діаметром 45.00 м, сполученого у верхній частині з положистим сферичним куполом товщиною 1.10 м і внутрішнім сферичним радіусом 35.00 м.

Нижня опорна плита знаходиться на позначці 13.20 м. Загальна висота захисної оболонки від поверхні опорної плити до найвищої позначки купола - 66.45 м, складає 53.25 м. Зона сполучення циліндра і купола між позначками 55.60 м і 61.00 м посилена жорстким залізобетонним кільцем (анкерним карнизом), що є місцем анкерівки арматури у вигляді армоканатів з високоміцного дроту. У циліндричній частині захисної оболонки поблизу анкерного карниза між позначками 44.40 м і 45.60 м знаходиться консоль підкранової балки.

Система попереднього напруження захисної оболонки призначена для обтиснення залізобетонних конструкцій оболонки з метою сприйняття аварійних навантажень. Попереднє напруження забезпечується створенням системи геликоїдально-петлевого армування (у циліндрі) і

ортогонально-петлевого армування (у куполі) арматурними канатами, поміщеними в поліетиленові канали. У циліндричній частині згідно з проектом розташовані 96 арматурних канатів, що обгинають оболонку по гелікоїдальній траєкторії під кутом 35.05 градусів до горизонтальної площини. Купольна частина оболонки згідно з проектом підсилюється системою з 36 армоканатів, що створюють дві групи з взаємно перпендикулярною орієнтацією. Система попереднього напруження містить у собі армоканати, анкерні верхні, купольні й опорні нижні блоки, гідродомкрати, насосні станції, системи керування і контролю.

Металеve облицювання товщиною 8 мм розташоване на внутрішній поверхні залізобетонної оболонки для забезпечення її герметичності.

Проект захисної оболонки розроблений Московським інститутом "Атоменергопроект". Проект системи попереднього напруження захисної оболонки, порядок її супроводу й обслуговування розроблений Московським інститутом "Оргенергострой".

Вихідні дані для розрахунку захисних оболонок включають дані про геометричні і фізичні параметри споруди і системи попереднього напруження захисної оболонки, наведені в проектній документації про матеріали конструкції, вихідні події, навантаження і впливи.

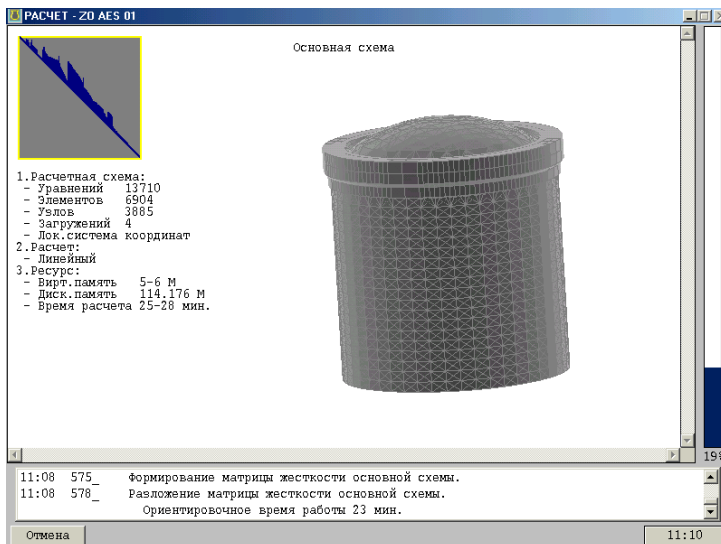


Рис. 1. ПК ЛПА. Процесс розрахунку захисної оболонки ВВЕР-1000/В-320

Фізико-механічні характеристики матеріалів захисної оболонки приймаються згідно з нормами [4]. Матеріал розглянутої конструкції - бетон класу В30. Ненапружена стержнева арматура класу А-III. Матеріал гермооблицювання - сталь ВСтЗсп5. Параметри армоканатів наведені в ТУ В 0249543-037-96 "Канат арматурний для систем попереднього напруження захисних оболонок АЕС".

Класифікація навантажень і впливів приймається згідно з нормами [3, 5]. Розрахункові комбінації навантажень дозволяють враховувати три основні групи режимів навантажень: передпускові, експлуатаційні й особливі.

Поточний стан системи попереднього напруження захисної оболонки повинен задаватися за результатами контрольно-профілактичних робіт. Однак, для порівняльних розрахунків зусилля натягу в армоканатах приймалося постійним - 10000 кН.

Розрахункова модель захисної оболонки (рис. 1 – 3) побудована з урахуванням наступних допущень, прийнятих в ідентичній моделі GRS, Німеччина:

- об'єкт розрахунку - частина захисної оболонки, розташована вище позначки +13,2м.
- з'єднання циліндричної частини захисної оболонки з нижчерозташованою плитою стилобату - жорстке защемлення.
- внутрішнє металеве гермооблицювання, люки, шлюзи в розрахунку не враховуються.

Дискретизація захисної оболонки виконана на основі стержневих, пластинчастих і просторових скінченних елементів. Побудована чисельна модель містить 6904 скінченних елементів, 3885 вузлів, 13710 ступенів свободи. По висоті циліндричної частини використовується 19 скінченних елементів, в окружному напрямку -48 скінченних елементів. Купольна частина має ортогональну сітку, що повторює траєкторії армоканатів і перехідну зону, що забезпечує стикування з анкерним карнизом. В області анкерного карниза сіткова область також побудована з урахуванням траєкторій армоканатів .

Моделювання системи попередньо напружених армоканатів виконано методом [2] на основі стержневих скінченних елементів, що дозволяє адекватно відображати складні умови взаємодії армоканатів з поверхнею каналів. Моделювання системи попереднього напруження захисної оболонки виконано у відповідності з наступними допущеннями:

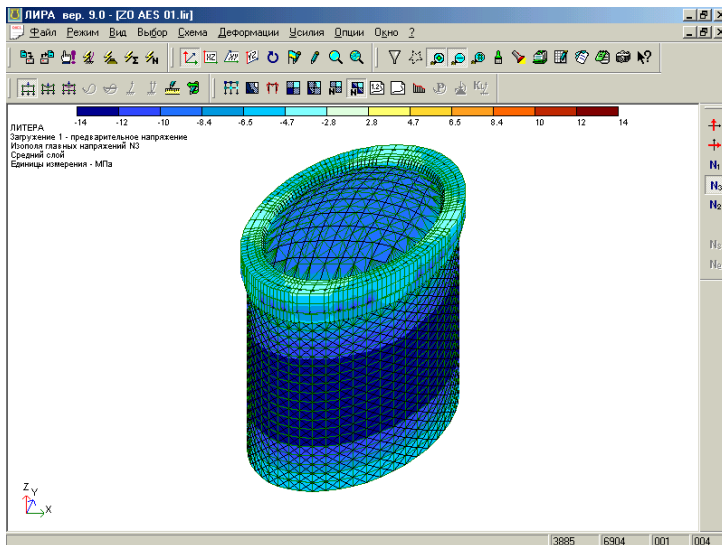


Рис. 2. Графічне середовище ПК ЛІРА. Головні напруження N3 захисної оболонки від впливу попереднього напруження в армоканатах 10000 кН

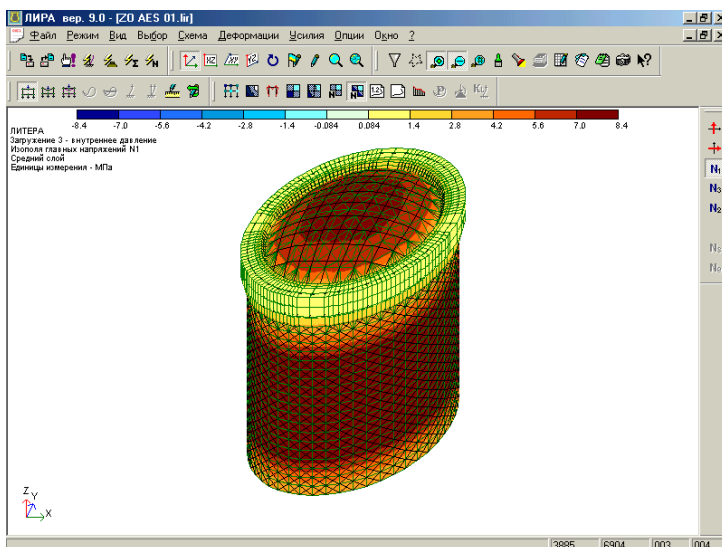


Рис. 3. Графічне середовище ПК ЛІРА. Головні напруження N1 захисної оболонки від впливу внутрішнього тиску 0.46 МПа

- траєкторії армоканатів у циліндричній частині проходять під кутом $35^{\circ}15'$ до горизонтальної площини, армування в купольній частині приймається ортогонально згідно з проектом; армоканати вважаються приведеними до серединної поверхні захисної оболонки;

- при моделюванні системи попереднього напруження враховуються втрати зусилля на тертя ($\mu = 0,089$) між армоканатом і поверхнею каналу.

Результати досліджень отримані для наступних видів навантажень захисної оболонки:

- попереднє напруження в армоканатах 10000кН;
- власна вага захисної оболонки;
- внутрішній тиск 0,46 МПа;

Найбільш характерні результати про напружений стан захисної оболонки у вигляді ізополів головних напружень $N1$, $N3$ для екстремальних видів навантажень наведені на рисунках 2, 3. Для зіставлення отриманих результатів на рисунках 4 – 9 наведені найбільш характерні графіки переміщень серединної поверхні захисної оболонки із відображенням відносної величини похибки у межах 10 %.

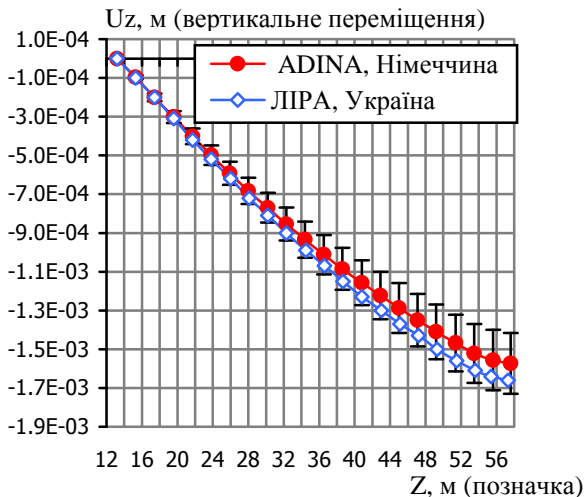


Рис. 4. Вертикальні переміщення серединної поверхні циліндричної частини захисної оболонки від впливу власної ваги

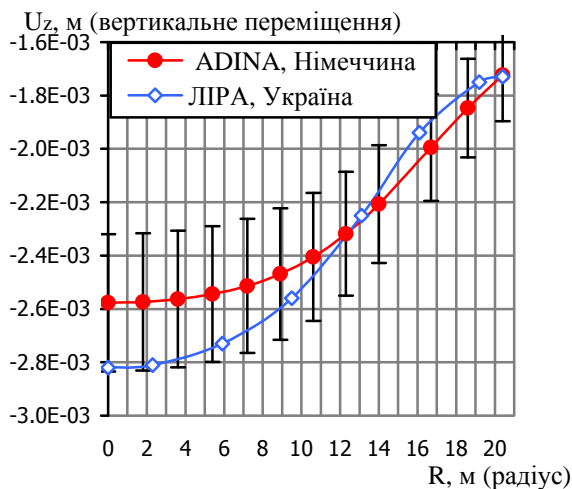


Рис. 5. Вертикальні переміщення серединної поверхні купольної частини захисної оболонки від впливу власної ваги

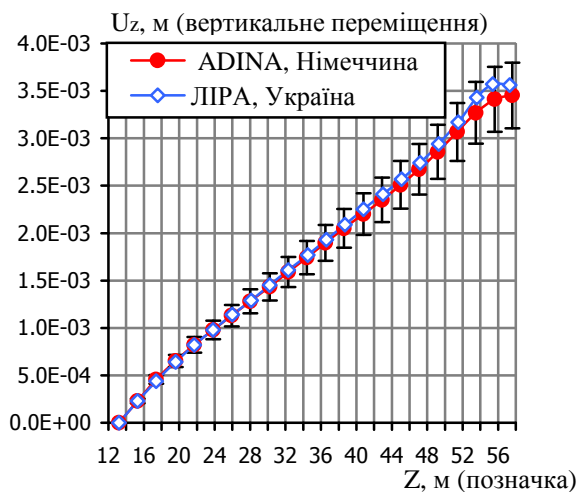


Рис. 6. Вертикальні переміщення серединної поверхні циліндричної частини захисної оболонки від впливу внутрішнього тиску 0.46 МПа

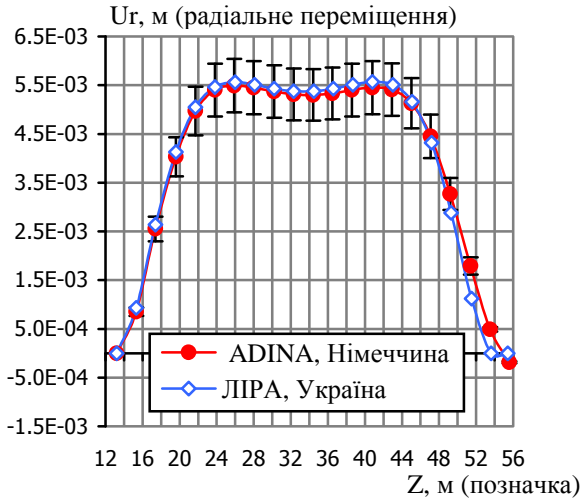


Рис. 7. Радіальні переміщення серединної поверхні циліндричної частини захисної оболонки від впливу внутрішнього тиску 0.46 МПа

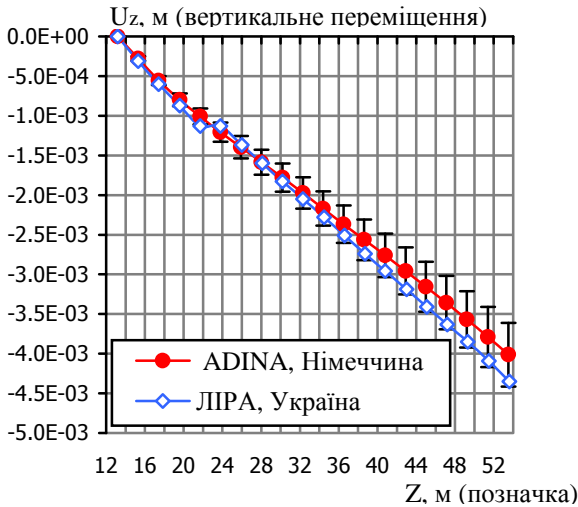


Рис. 8. Вертикальні переміщення серединної поверхні циліндричної частини захисної оболонки від впливу попереднього напруження в армоканатах 10000 кН

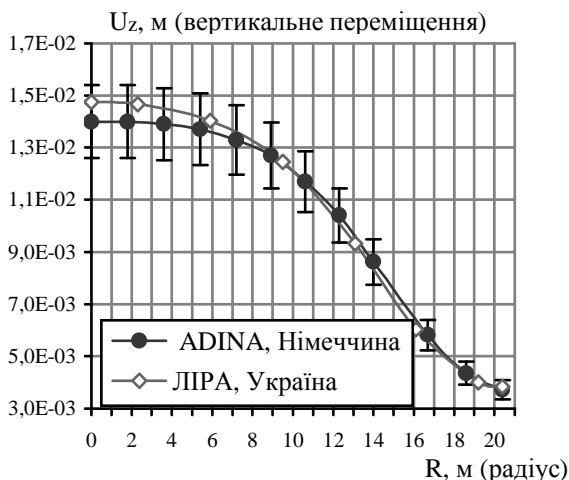


Рис. 9. Вертикальні переміщення середньої поверхні купольної частини захисної оболонки від впливу внутрішнього тиску 0.46 МПа

Висновки. Вирішена проблема адекватного комп'ютерного моделювання та розрахункового обґрунтування безпеки експлуатації особливо складних технічних об'єктів АЕС України в умовах екстремальних навантажень, що базується на достовірній інформації про напружено-деформований стан цих об'єктів із застосування сучасних комп'ютерних технологій, створених на основі універсальних програмних комплексів. Результати досліджень наглядно показують, що отримані розрахункові параметри напружено-деформованого стану захисної оболонки за допомогою програмних комплексів ЛІРА (Україна) і ADINA (Німеччина) мають гарне узгодження і можуть успішно і ефективно застосовуватися для розрахункового обґрунтування безпеки експлуатації захисних оболонок реакторних відділень ВВЕР-1000 АЕС в реальних умовах навантажень.

1. Городецкий А.С., Слободян Я.Е. и др. / Программный комплекс ЛІРА-Windows. Теоретические основы. -Киев: НИИАСС. - 1997. –Т. 5. -90 с.
2. Slobodyan Y., Majewski S., Genzerskiy Y. FEM software package LIRA-W for structural design // Finite Element Methods & Standards. - Stuttgart: Universitat. - 1997. - P. 67-75.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия.
4. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции.
5. ПНАЭ Г-10-007-89 "Нормы проектирования железобетонных сооружений локализирующих систем безопасности атомных станций".