

О. В. Гондляр¹, В. Б. Крицький²,
В. Ю. Онопрієнко¹, А. О. Чемерис¹, Н. І. Крицька²

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

² Державний науково-технічний центр з ядерної
та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

Розрахунковий аналіз термомеханічного стану герметизуючого сталевих облицювання захисних оболонки енергоблоків АЕС з реакторними установками ВВЕР-1000/В-320 в аварійних умовах

З метою визначення можливості й обсягу порушень цілісності герметизуючого сталевих облицювання (ГСО), зокрема можливості втрати захисною оболонкою реакторного відділення АЕС в аварійних умовах локалізуючої функції, виконано розрахунковий аналіз термомеханічного стану гермооблицювання в разі прояву відповідних екстремальних впливів. За результатами дослідження отримано функції еволюції параметрів напружено-деформованого стану в залізобетоні та сталевому гермооблицюванні залежно від зміни аварійних температури і тиску в реакторному відділенні. Оцінено наявність запасу несучої спроможності ГСО.

Ключові слова: захисна оболонка, герметизуюче сталево облицювання, термомеханічний стан, розрахункове моделювання, напружено-деформований стан.

**А. В. Гондляр, В. Б. Крицький, В. Ю. Онопрієнко, А. О. Чемерис,
Н. І. Крицька**

Расчетный анализ термомеханического состояния герметизирующей стальной облицовки защитных оболочек энергоблоков АЭС с реакторными установками ВВЭР-1000/В-320 в аварийных условиях

С целью определения возможности и объема нарушений целостности герметизирующей стальной облицовки (ГСО), в частности возможности потери защитной оболочкой реакторного отделения АЭС в аварийных условиях локализующей функции, выполнен расчетный анализ термомеханического состояния гермооблицовки для случая реализации соответствующих экстремальных воздействий. По результатам исследования получены функции эволюции параметров напряженно-деформированного состояния в железобетоне и стальной гермооблицовке в зависимости от изменения аварийных температуры и давления в реакторном отделении. Оценено наличие запаса несущей способности ГСО.

Ключевые слова: защитная оболочка, герметизирующая стальная облицовка, термомеханическое состояние, расчетное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

© О. В. Гондляр, В. Б. Крицький, В. Ю. Онопрієнко, А. О. Чемерис,
Н. І. Крицька, 2017

Реакторні відділення (РВ) більшості енергоблоків АЕС України розташовані всередині залізобетонних захисних оболонок (ЗО), які, з одного боку, мають захистити реакторну установку від зовнішніх несприятливих впливів природного та (або) техногенного походження, а з іншого боку — запобігти викиду радіоактивних речовин у довкілля у випадку проектних і запроектованих технологічних аварій у РВ. Відповідно, з-поміж факторів, які характеризують безпеку енергоблока АЕС, працездатність ЗО є одним з найсуттєвіших.

Енергоблоки АЕС України, зокрема ЗО, проектували і зводили здебільшого в період з 1970 по 1989 рр. відповідно до положень загальнобудівельних нормативних документів (НД), без врахування специфічних національних і міжнародних (рекомендованих МАГАТЕ) вимог з безпеки в атомній енергетиці, які були розроблені й набули чинності лише після важкої аварії на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС в 1986 р. Відповідно до положень загальнобудівельних НД [1–3], механіко-міцнісні розрахунки ЗО виконували за спрощеними інженерними формулами, розробленими для оболонкових конструкцій класичної ідеальної форми (циліндр, сфера, конус тощо). Згадані формули не враховують такі особливості реальної споруди ЗО, як:

нерегулярна складна геометрія, зокрема наявність технологічних отворів для розташування люків-шлюзів і проходок, потовщень і зламів поверхонь конструкції в зонах отворів, анкерного карниза, підкранової консолі, з'єднання циліндричної частини ЗО з опорною плитою;

неоднорідність матеріалу ЗО за товщиною — нашарування герметизуючого сталевих облицювання (ГСО), залізобетону з ненапруженою гнучкою і жорсткою арматурою, сітки арматурних канатів (АК) системи переднапруження захисної оболонки (СПЗО) тощо;

фізично нелінійні залежності деформування ГСО і залізобетону тощо.

Конструкції ЗО розглядали як сукупність оболонок ідеальної форми (циліндр, сфера, конус), котрі розраховувались окремо, без конструктивного зв'язку з іншими частинами споруди, тобто взаємний вплив окремих оболонкових фрагментів ЗО, обумовлений їх перетинанням та (або) контактом, не враховувався [4]. Така розрахункова методологія принципово не дає змоги достовірно визначити параметри напружено-деформованого стану (НДС) конструкції ЗО в зонах концентрації напружень, які виникають у місцях зазначеної нерегулярної геометрії та (або) конструктивної неоднорідності (рис. 1). Крім того, застосовані спрощені інженерні підходи виключають можливість коректного, адекватного реальному функціонуванню ЗО, моделювання впливу на споруду зусиль натягу АК СПЗО (наприклад, врахування таких аспектів, як зменшення зусилля натягу вздовж АК через наявність тертя між АК і поверхнею каналотворювача, зростання зусилля натягу вздовж АК внаслідок збільшення його довжини в разі певного «роздуття» ЗО, спричиненого дією внутрішнього надлишкового аварійного тиску).

Потенційно можливе експериментальне моделювання термомеханічного стану ЗО — стендові дослідження зменшених аналогів споруди, натурні спостереження й випробування тощо — також немає підстав вважати достатньо ефективним і таким, що дасть достовірні результати, зважаючи на такі фактори:

технічну складність, високу витратність і довготривалість створення маломасштабних моделей ЗО, які враховують (коректно відтворюють) всі значущі конструктивні особливості реальної споруди;

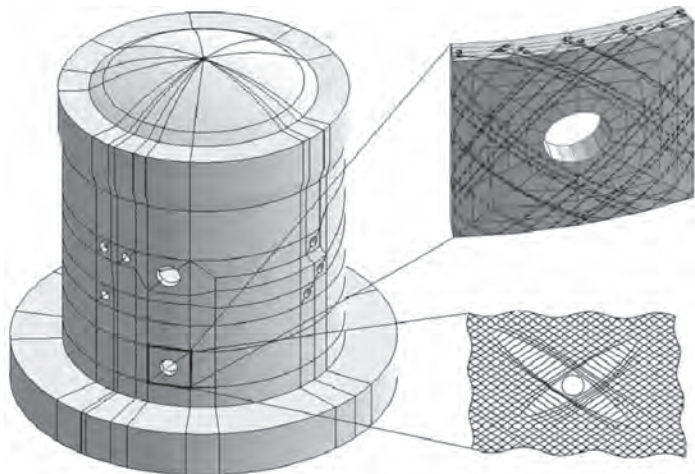


Рис. 1. Розбиття ЗО енергоблока АЕС із сіткою армоканатів СПЗО на структурно однорідні фрагменти

невизначеність коефіцієнтів масштабування (факторів забезпечення відповідності між значеннями параметрів НДС моделі та реальної ЗО), згідно з якими мають бути призначені геометричні розміри моделі, параметри навантажень на модель, фізико-механічні характеристики матеріалів моделі (бетону, гнучкої та жорсткої ненапруженої, а також попередньо напруженої арматури, ГСО) тощо;

фактичну неможливість створення для моделі ЗО розрахункових комбінацій силових навантажень, а також температурних, силових і кінематичних впливів: зовнішніх і внутрішніх, постійних (статичних, стаціонарних) і змінних у часі (динамічних, нестационарних), в умовах реалізації яких згідно з вимогами проекту ядерної установки і чинних НД з ЯРБ має зберігатися працездатність (геометрична стабільність і герметичність) споруди ЗО, яка є компонентом системи герметичного огороження (СГО) реакторного відділення енергоблока АЕС і складовою локалізуючої системи безпеки (ЛСБ) реакторної установки (РУ);

необхідність виконання досліджень на великій кількості моделей з метою розгляду всього спектра потенційно небезпечних експлуатаційних режимів і аварійних сценаріїв, а також для отримання вибірки результатів, обсяг якої є достатнім для статистично коректної обробки даних.

Що стосується натурних спостережень і випробувань із застосуванням засобів візуального та інструментального (неруйнівного) контролю конструкцій, то для аналізу термомеханічного стану ЗО вони є принципово нерезультативними, оскільки можуть бути реалізовані виключно в період планово-попереджувальних ремонтів (у стані РУ «холодний останок») і є неможливими навіть під час нормальної експлуатації РУ (в режимі «робота реактора на потужності»), не говорячи про фіксацію наслідків силових динамічних навантажень та (або) температурних впливів на ЗО в аварійних умовах чи при звичайній прогнозованому прояві екстремальних зовнішніх факторів.

Розрахункові дослідження НДС і працездатності ЗО енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 виконувались в Україні починаючи з 1985 р., проте без розгляду питання збереження працездатності (герметичності, локалізуючої функції) ЗО в аварійних умовах. Певною мірою це обумовлювалося складним характером протікання теплофізичних процесів у РВ, а також невизначеністю окремих параметрів розвитку аварійних сценаріїв, що виключало побудову

докладних (реалістичних — без множинних спрощуючих припущень) розрахункових моделей ЗО і поглиблені багатофакторні дослідження працездатності споруди. Зважаючи на обмежені можливості й низьку ефективність (достовірність) застосування спрощених інженерних розрахункових підходів і експериментальних досліджень (натурних спостережень, випробувань) як засобу визначення параметрів НДС і оцінки працездатності ЗО в аварійних (екстремальних) умовах, є підстави стверджувати, що відповідний поглиблений термомеханічний аналіз стану ЗО можливо виконати лише вдосконалим математичним моделюванням за допомогою сучасних чисельних методів розрахункового аналізу, найпоширенішим з яких є метод скінченних елементів (МСЕ).

Таким чином, зважаючи на відсутність відповідних докладних досліджень, залишається актуальною проблема підтвердження (доведення) працездатності (герметичності, збереження локалізуючої функції) ЗО в разі термосилових впливів на споруду, притаманних аварійним умовам у РВ.

Відповідно, *мета цієї роботи* полягає у визначенні за допомогою сучасних технологій математичного моделювання (застосовуючи ефективну схему МСЕ, досконалу, адекватну реальному об'єкту, розрахункову МСЕ-модель, високоточні проблемно орієнтовані обчислювальні алгоритми тощо) значень параметрів НДС і ступеню працездатності (герметичності, збереження локалізуючої функції) конструкції споруди ЗО в процесі розвитку аварійного сценарію в РВ.

У загальному випадку математичне моделювання еволюції параметрів НДС конструкції при дії змінних у часі зовнішніх природних або внутрішніх технологічних термосилових впливів є класичною задачею нестационарної механіки деформівного твердого тіла [5]. У нашій статті наведено результати розробки й практичного застосування розрахункової математичної моделі, яка є інструментом визначення змін параметрів НДС ЗО у разі термосилових впливів і на відміну від відомих альтернативних розрахункових МСЕ-моделей уможливує дослідження НДС споруди з урахуванням усіх суттєвих чинників, які реалізуються і впливають на функціонування й працездатність об'єкта в аварійних умовах.

Одним з головних критеріїв ефективності вибраної для розрахунків МСЕ-моделі та відповідних обчислювальних алгоритмів є можливість отримання шуканого розв'язку в якнайстиліший термін. Останнє, за умови використання МСЕ, суттєвою мірою залежить від реалізованої математичної схеми скінченного елемента (СЕ), яким моделюються структура і НДС споруди. ЗО є геометрично складною тонкостінною просторовою конструкцією, якій притаманні переважно суттєво криволінійні та локально ламані обриси. У разі опису поверхні такої конструкції класичними СЕ для прийнятно точної апроксимації нерегулярностей її геометрії та функцій зміни параметрів НДС потрібна дуже велика кількість скінченних елементів. Зважаючи на це, найдоцільніше для опису моделювання ЗО використовувати СЕ криволінійного обрису, для яких коефіцієнти матриці жорсткості визначаються на основі положень моментної схеми скінченних елементів (МССЕ) [6, 7]. Це дає змогу в процесі моделювання (структурної дискретизації) конструкції ЗО обмежитися відносно малою кількістю СЕ (відповідно, малою кількістю невідомих розв'язувальної системи рівнянь) і, як наслідок, мінімізувати (зменшити на порядок) обчислювальний час розв'язання задачі (розрахункового моделювання).

Постановка задачі дослідження

Спосіб досягнення задекларованої мети дослідження (задача дослідження) полягає у відтворенні на основі використання МСЕ і розробленої розрахункової МСЕ-моделі еволюційного процесу зміни значень параметрів НДС компонентів споруди ЗО в процесі розвитку аварійного сценарію в РВ.

Створюючи математичну схему ефективного СЕ, орієнтованого на чисельне розв'язання рівнянь механіки руйнування конструкцій ЗО, треба брати до уваги низку особливостей зазначеного об'єкта. Зокрема, визначати параметри НДС ЗО потрібно на основі теоретичних положень механіки деформованого твердого тіла, орієнтованих на розгляд просторових (тривимірних) задач, оскільки геометрія ЗО і конфігурація впливу на споруду зусиль натягу АК СПЗО є істотно невісесиметричними.

Як правило, процесу тріщиноутворення в багатошарових оболонкових системах під впливом статичних і динамічних навантажень притаманний нелінійний характер. При цьому окремі фрагменти досліджуваного об'єкта можуть набувати істотних зсувів і жорстких поворотів. Зважаючи на це, апроксимуючі функції СЕ мають забезпечувати дотримання умов спільності деформацій при зсувах окремого СЕ (або фрагмента конструкції) як «жорсткого цілого». Ефективним математичним інструментом виключення в результатах розрахунків «фіктивних» деформацій при «жорстких зсувах» елементарних об'ємів конструкції є моментна схема методу скінченних елементів. МССЕ забезпечує врахування «жорстких зсувів», а в підсумку — збіг і усталеність наближених розв'язків завдяки оптимізації властивостей матриці жорсткості методом додавання до її коефіцієнтів компонентів, які за фізичним змістом є елементами модифікації диференціальних геометричних рівнянь, що пов'язують переміщення і деформації в об'ємі СЕ.

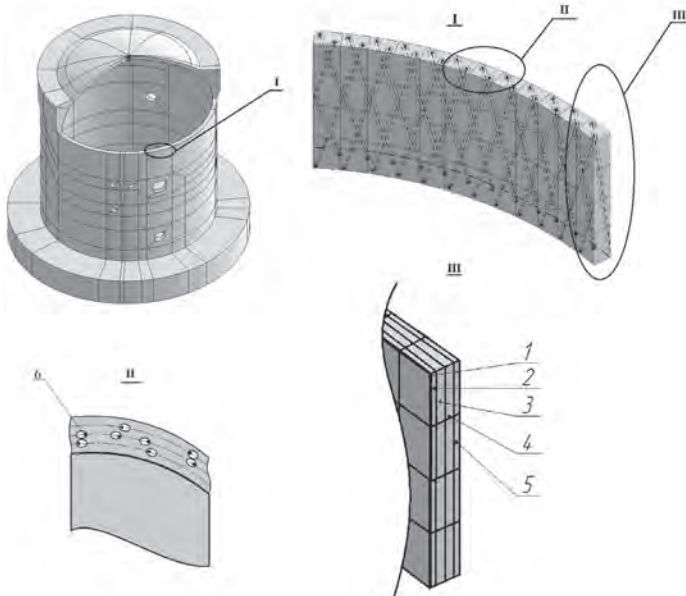


Рис. 2. Моделювання стінки ЗО (з армоканатами СПЗО)

багатошаровою системою скінченних елементів:

I — розташування траєкторій каналотворювачів АК в площині стінки ЗО; *II* — розташування перерізів каналотворювачів АК за товщиною стінки ЗО; *III* — багатошарове моделювання залізобетонної стінки ЗО

Перевагою застосування МССЕ є також універсальність схеми: наближені формули для деформацій СЕ криволінійного і прямолінійного обрису не залежать від геометричної форми СЕ та поліноміального порядку апроксимуючих функцій. Це дає змогу ефективно використовувати розроблені на основі МССЕ скінченні елементи для аналізу НДС складних комбінованих просторових оболонкових систем.

У цій роботі конструкцію ЗО розглядаємо як багатошарову систему (рис. 2), утворену внутрішнім сталевим гермооблицюванням *1*, двома шарами бетону *3*, *4*, в яких розташовані каналотворювачі з армоканатами *6*. Між шарами *1* та *3* міститься шар *2* залізобетону з ненапруженою арматурою. Аналогічним до шару *2* є зовнішній шар залізобетону *5*.

Процес нелінійного деформування такої складної неоднорідної структури, якою є стінка ЗО, доцільно аналізувати на базі уточнених теорій багатошарових систем. У цій роботі для аналізу процесів деформування шарів стінки ЗО використано ітераційно-аналітичну теорію оболонок (ІАТО) [8–13]. Методологія цієї теорії дозволяє завдяки застосуванню спеціальної процедури генерувати фізично обґрунтовані функції зведення, які відтворюють залежності зміни параметрів НДС матеріалу по товщині ЗО, а також за допомогою вказаних функцій зведення побудувати для споруди ЗО систему основних розв'язуючих тривимірних рівнянь, порядок якої не залежить від кількості шарів матеріалу по товщині стінки ЗО.

Таким чином, викладений підхід дає змогу отримати функції зміни компонентів НДС ЗО в напрямку утворюючої поверхні та за товщиною стінки ЗО, зокрема врахувати структурні особливості складових ЗО — залізобетону, АК і ГСО.

Усі наведені в цій роботі результати розрахунків отримані за допомогою розробленого в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» програмного засобу (ПЗ) «АПРОКС», який реалізує викладену методологію застосування МСЕ і є інструментом автоматизованого проектування комбінованих конструкцій та систем.

Загальний склад розрахункових досліджень

Розрахункові дослідження ЗО, опис яких наведено в цій роботі, виконані в середовищі ПЗ «АПРОКС» і склалися з трьох етапів:

1. Розрахунок за допомогою ПЗ «АПРОКС» параметрів НДС ЗО в нормальних важких умовах експлуатації (режим інтегральних випробувань ЗО на міцність) в разі окремої та спільної дії таких силових чинників, як власна вага, вплив обтиснення споруди армоканатами СПЗО, вплив внутрішнього надлишкового випробувального тиску.

2. Верифікація реалізованих у ПЗ «АПРОКС» схеми МСЕ, розрахункової МСЕ-моделі ЗО і обчислювальних алгоритмів шляхом зіставлення результатів розрахунків, отриманих на етапі 1, з відповідними альтернативними результатами, отриманими за допомогою ПЗ «ЛИРА-САПР», «ADINA»; зіставлення результатів термомеханічних розрахунків модельних задач у середовищі ПЗ «АПРОКС» з результатами відповідних аналітичних розрахунків.

3. Розрахунок у середовищі ПЗ «АПРОКС» параметрів НДС ЗО для аварійних умов (режим максимальної проектно-аварійної дії таких чинників, як власна вага, вплив обтиснення споруди армоканатами СПЗО, вплив на ЗО внутрішнього надлишкового аварійного тиску, вплив на ЗО аварійної температури пароповітряного середовища в підоболонковому просторі.

Дослідження НДС ЗО на етапі 3 склалися з двох груп розрахунків:

розрахунку параметрів НДС ЗО від термосилових впливів в аварійних умовах для усталеного процесу теплопередачі — етап 3.1;

моделювання еволюції параметрів НДС ЗО від термосилових впливів в аварійних умовах для перехідного процесу теплопередачі — етап 3.2.

Розглянемо далі результати чисельних досліджень по кожному з етапів.

ЕТАП 1. Розрахунок НДС ЗО в нормальних важких умовах експлуатації (режим інтегральних випробувань на міцність)

Розрахункова МСЕ-модель ЗО енергоблока АЕС з ВВЕР-1000 типу В-320, створена в середовищі ПЗ «АПРОКС» і застосована для визначення параметрів НДС ЗО в нормальних важких умовах експлуатації (режим інтегральних випробувань на міцність), зображена на рис. 3.

МСЕ-модель ЗО створена з урахуванням припущень, притаманних розрахунковій моделі ЗО, розробленій GRS (Німеччина) [14]:

досліджується частина ЗО, розташована вище поверхні опорної плити споруди (висотна позначка 13.200 м);

з'єднання циліндричної частини ЗО з нижче розташованою опорною плитою (висотна позначка 13.200 м) приймається жорстким;

жорсткості ГСО і ненапруженої арматури не враховуються зважаючи на їх суттєву малість порівняно з жорсткістю АК СПЗО (аналогічно моделі GRS [14]).

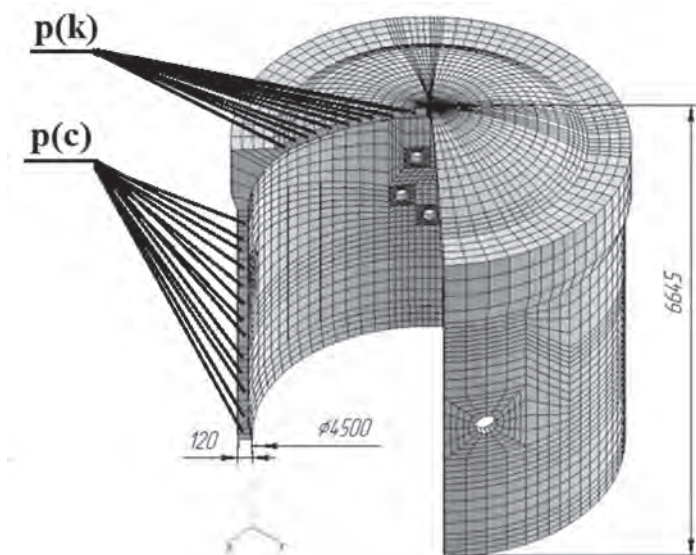


Рис. 3. Розрахункова МСЕ-модель ЗО енергоблока АЕС з РУ ВВЕР-1000 типу В-320, створена в середовищі ПЗ «АПРОКС» (зображено 3/4 МСЕ-моделі конструкції споруди; розміри вказані в сантиметрах)

Фізико-механічні характеристики матеріалів захисної оболонки взято за ДБН В.2.6-98:2009 [15]:

бетон класу міцності на стискання С25/30:

модуль деформації $E_{cd} = 25000$ МПа;

гранична деформація стискання $\epsilon_{cu1,cd} = 0,00328$;

коефіцієнт Пуассона $\nu_b = 0,20$;

усереднена густина $\rho_b = 2500$ кг/м³;

розрахункові опори за граничними станами I групи (по несучій здатності): при стисканні $f_{cd} = 17,0$ МПа; при розтягуванні $f_{ctd} = 1,2$ МПа = 12,2 кгс/см²;

розрахункові опори за граничними станами II групи (по деформаціях): при стисканні $f_{ck,prism} = 22,0$ МПа; при розтягуванні $f_{ctk,0,05} = 1,8$ МПа;

сталеве герметичне облицювання завтовшки 8 мм:

модуль пружності $E_h = 206000$ МПа;

коефіцієнт Пуассона $\nu_h = 0,30$;

усереднена густина $\rho_h = 7850$ кг/м³;

коефіцієнт температурного розширення $\alpha = 0,000012$ °С⁻¹;

розрахункові опори за граничними умовами I групи (по міцності): за границею плинності $R_y = 230$ МПа = 2256 кгс/см²; за тимчасовим опором $R_u = 350$ МПа;

розрахункові опори за граничними умовами II групи (по деформаціях): за границею плинності $R_y = 235$ МПа; за тимчасовим опором $R_u = 360$ МПа.

Зміна значень переміщень та параметрів НДС аналізується в певних контрольних точках, розташованих на серединній поверхні купольної $p(k)$ та циліндричної $p(c)$ частин ЗО (див. рис. 3). Чисельні значення координат контрольних точок наведено в табл. 1 та 2.

Таблиця 1. Контрольні точки купольної частини ЗО

№ контрольної точки	Координати		
	X	Y	Z
1	1875,45	0	6050,2
2	1823,00	0	6086,5
3	1769,25	0	6121,0
4	1714,30	0	6153,6
5	1658,30	0	6184,4
6	1534,50	0	6246,5
7	1408,30	0	6303,8
8	1280,00	0	6356,2
9	1149,70	0	6403,5
10	1017,70	0	6445,7
11	884,20	0	6482,7
12	749,30	0	6514,5
13	613,30	0	6541,0
14	476,40	0	6562,2
15	338,80	0	6578,1
16	200,60	0	6588,6
17	62,10	0	6593,7
18	31,00	0	6594,1

Таблиця 2. Контрольні точки циліндричної частини ЗО

№ контрольної точки	Координати		
	X	Y	Z
1	2280,0	0	1300,0
2	2287,0	0	1396,0
3	2295,0	0	1492,0
4	2302,5	0	1588,0
5	2310,0	0	1684,0
6	2310,0	0	1859,0
7	2310,0	0	2034,0
8	2310,0	0	2209,0
9	2310,0	0	2384,0
10	2310,0	0	2485,2
11	2310,0	0	2586,4
12	2310,0	0	2687,6
13	2310,0	0	2788,8
14	2310,0	0	2890,0
15	2310,0	0	3140,0
16	2310,0	0	3390,0
17	2310,0	0	3640,0
18	2310,0	0	3890,0
19	2310,0	0	4035,0
20	2310,0	0	4180,0
21	2310,0	0	4325,0
22	2310,0	0	4470,0
23	2310,0	0	4630,0
24	2310,0	0	4710,0
25	2310,0	0	4790,0
26	2310,0	0	4550,0
27	2310,0	0	4868,5
28	2310,0	0	4947,0
29	2310,0	0	5025,5
30	2310,0	0	5104,0

Фізико-механічні характеристики армоканатів СПЗО призначені згідно з ТУ У 0249543-037-96 [16].

Результати досліджень отримані для такого складу впливів на ЗО: власна вага; зусилля натягу АК СПЗО 10000 кН; внутрішній надлишковий випробувальний тиск у підболоноквому просторі 0,46 МПа.

Результати розрахунків параметрів НДС відображені на рис. 4–12.

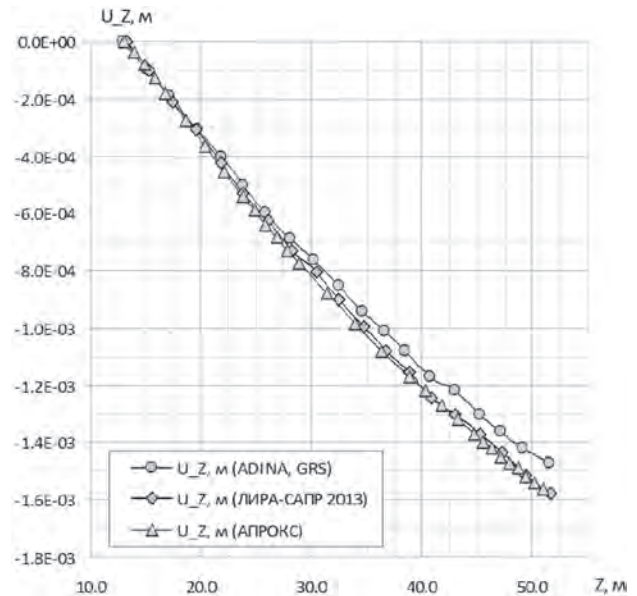


Рис. 4. Вертикальні переміщення ЗО від впливу власної ваги: циліндрична частина

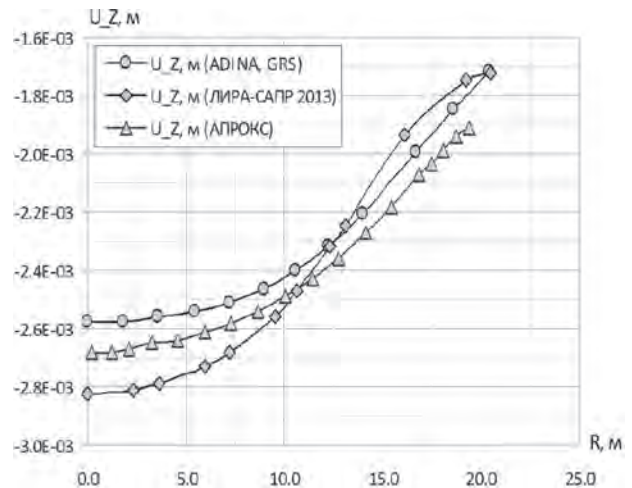


Рис. 5. Вертикальні переміщення ЗО від впливу власної ваги: купольна частина

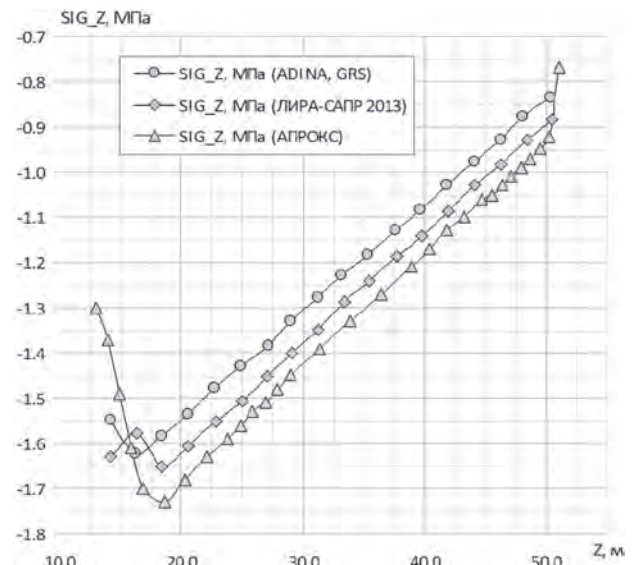


Рис. 6. Меридіональні напруження в ЗО від впливу власної ваги: циліндрична частина

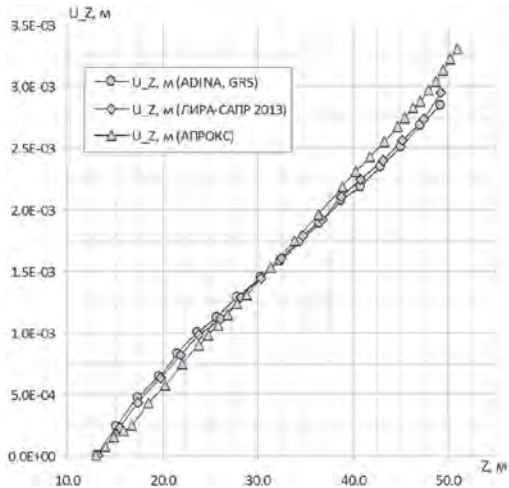


Рис. 7. Вертикальні переміщення в ЗО від впливу внутрішнього надлишкового випробувального тиску: циліндрична частина

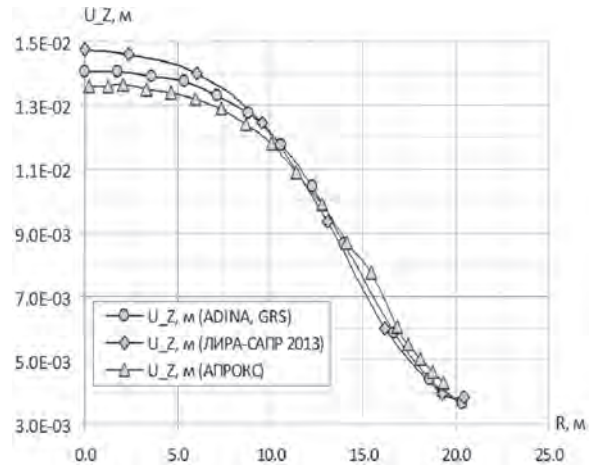


Рис. 8. Вертикальні переміщення в ЗО від впливу внутрішнього надлишкового випробувального тиску: купольна частина

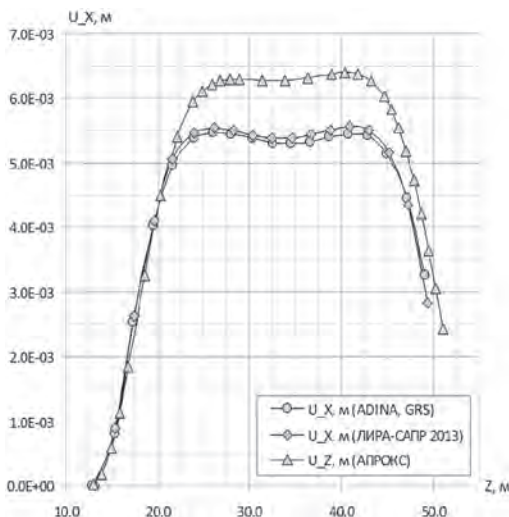


Рис. 9. Радіальні переміщення в ЗО від впливу внутрішнього надлишкового випробувального тиску: циліндрична частина

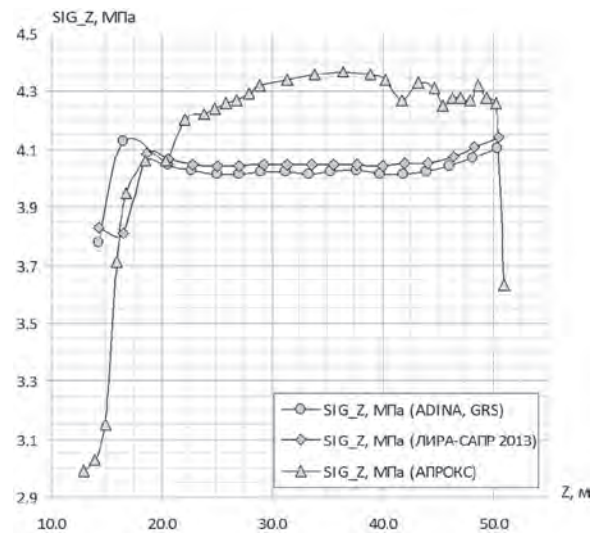


Рис. 10. Меридіональні напруження в ЗО від впливу внутрішнього надлишкового випробувального тиску: циліндрична частина

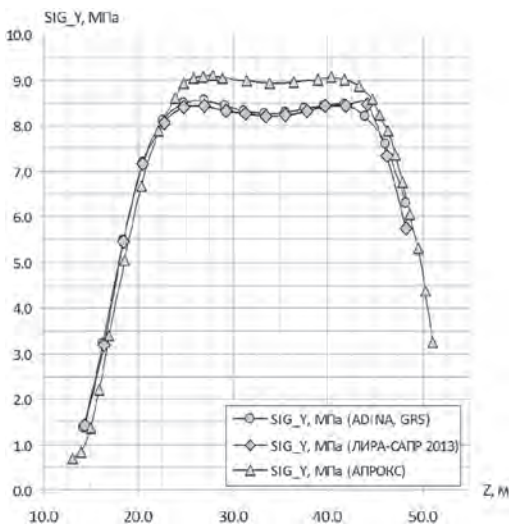


Рис. 11. Колові напруження в ЗО від впливу внутрішнього надлишкового випробувального тиску: циліндрична частина

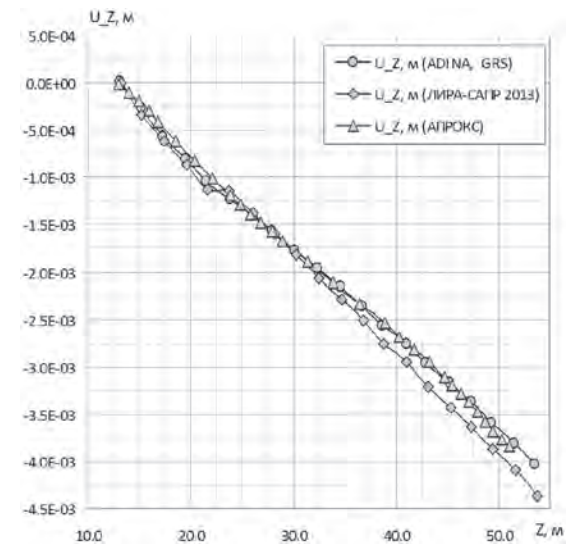


Рис. 12. Вертикальні переміщення в ЗО від впливу обтиснення армоканатами СПЗО: циліндрична частина

ЕТАП 2. верифікація реалізованих у ПЗ «АПРОКС» схеми МСЕ, розрахункової МСЕ-моделі ЗО і обчислювальних алгоритмів

Верифікація призначена довести прийнятність для отримання достовірних значень параметрів НДС ЗО на етапі 3 досліджень застосованої схеми МСЕ (МСЕ), розробленої розрахункової МСЕ-моделі ЗО, а також реалізованих у ПЗ «АПРОКС» обчислювальних алгоритмів термомеханічного аналізу.

Верифікація реалізованих у ПЗ «АПРОКС» схеми МСЕ, розрахункової МСЕ-моделі ЗО і обчислювальних алгоритмів для випадку механічних (силових) впливів здійснена для випадку нормальних важких умов експлуатації (режим інтегральних випробувань на міцність) шляхом порівняння результатів розрахунків НДС ЗО, обчислених з використанням ПЗ «АПРОКС» на етапі 1 дослідження, з відповідними результатами, отриманими за допомогою альтернативних ПЗ — «ЛИРА-САПР» (Україна) та «ADINA» (GRS, Німеччина) [14].

Результати верифікаційних порівнянь — графіки переміщень і напружень для контрольних точок на серединній поверхні ЗО, відображені на рис. 4–12, — свідчать, що розбіжність значень параметрів НДС ЗО, отриманих за допомогою ПЗ «АПРОКС» і альтернативних ПЗ, становить від 2 до 20 % (у середньому 11 %). Така розбіжність може бути оцінена як достатньо прийнятна зважаючи на те, що:

1) застосовані для отримання результатів програмні засоби «ЛИРА-САПР» і «ADINA» реалізують притаманні саме їм схеми МСЕ (зокрема, гіпотези й припущення щодо особливостей зміни параметрів НДС, апроксимуючі функції тощо) й обчислювальні алгоритми; крім того, ці ПЗ орієнтовані на використання ЕОМ різної програмно-апаратної архітектури;

2) застосовані для отримання результатів МСЕ-моделі ЗО не є ідентичними, а відображають набутий конкретним інженером-виконавцем розрахунковий досвід і традиції (стиль) відповідної інженерної школи (або проектно-дослідницької організації).

Верифікація реалізованих у ПЗ «АПРОКС» алгоритмів розв'язання задач теплопровідності (теплопередачі) здійснена порівнянням результатів, отриманих за допомогою ПЗ «АПРОКС», з аналітичними розв'язками двох тестових задач: 1) задачі нагрівання сталевго листа; 2) задачі нагрівання суцільного сталевго циліндра.

Задача нагрівання сталевго листа. Тестова задача (рис. 13) змодельована за описом, наведеним у [17], і сформульована так: визначити час τ , потрібний для нагрівання сталевго листа завтовшки $2\delta=24$ мм. Початкова температура $t_0=25$ °С, робоча температура в печі $t_{ж}=600$ °С. Нагрівання вважається закінченим у разі підвищення температури листа до $t_2=450$ °С.

Параметри теплопровідності, теплоємності та густини матеріалу: $\lambda=45,4$ Вт/(м·°С); $c=0,502$ кДж/(кг·°С); $\rho=7800$ кг/м³. Коефіцієнт тепловіддачі поверхні листа $\alpha=23,3$ Вт/(м²·°С).

Чисельний експеримент для розглянутої задачі засвідчив повну збіжність результатів розрахунку і аналітичного розв'язку (рис. 14).

Задача нагрівання суцільного сталевго циліндра. Тестова задача (рис. 15) змодельована за описом, наведеним у [17], і сформульована так: визначити час τ , потрібний для нагрівання довгого суцільного сталевго циліндра діаметром $d=2r=240$ мм від початкової температури $t_0=20$ °С

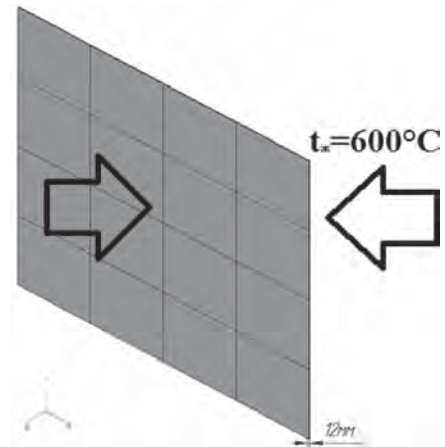


Рис. 13. Розрахункова модель у середовищі ПЗ «АПРОКС» задачі нагрівання сталевго листа

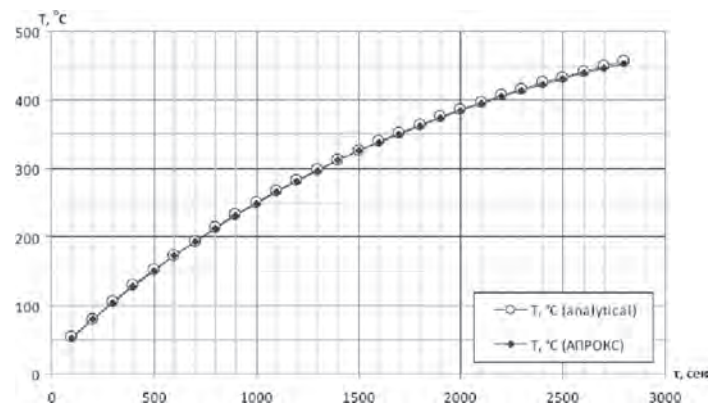


Рис. 14. Зіставлення графіків зміни в часі температури сталевго листа (для аналітичного розв'язання і розрахунку за допомогою ПЗ «АПРОКС»)

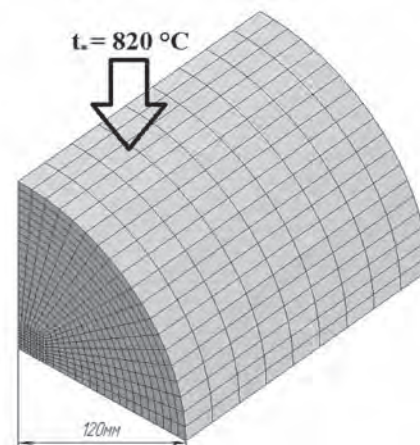


Рис. 15. Розрахункова модель у середовищі ПЗ «АПРОКС» задачі нагрівання сталевго циліндра

до температури $t_2=800$ °С (на осі циліндра) за умови, що робоча температура в печі становить $t_{ж}=820$ °С; визначити також температуру на поверхні циліндра t_2 наприкінці процесу нагрівання.

Прийняті для розрахунку коефіцієнти теплопровідності та температуропровідності сталі дорівнюють, відповідно, $\lambda=21$ Вт/(м·°С) і $a=6,11 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Коефіцієнт тепловіддачі поверхні циліндра $\alpha=140$ Вт/(м²·°С).

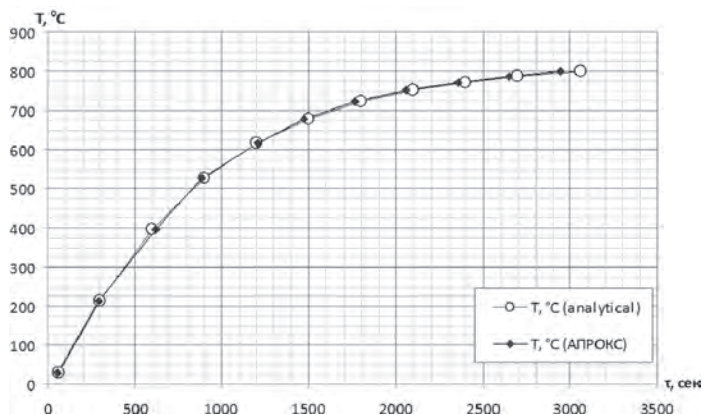


Рис. 16. Зіставлення графіків зміни в часі температури на осі сталевго вала (для аналітичного розв'язання і розрахунку за допомогою ПЗ «АПРОКС»)

Зіставлення аналітичного розв'язку тестової задачі з розв'язком, отриманим у цій роботі чисельним методом, свідчить (рис. 16) про наявність незначної розбіжності результатів (від 0 до 1,0 %), що для інженерних розрахунків є цілком прийнятним.

ЕТАП 3. Розрахунок НДС 3О в аварійних умовах (режим максимальної проектної аварії)

Розрахунок НДС 3О в аварійних умовах (етап 3) реалізовано аналогічно до розрахунку на етапі 1 з такими відмінностями МСЕ-моделі 3О, обчислювальних алгоритмів, а також складу та параметрів (інтенсивності) впливів на 3О:

враховано наявність у складі конструкції 3О ГСО і не-напруженої арматури (уточнення МСЕ-моделі, порівняно з МСЕ-моделлю етапу 1);

зусилля натягу АК у циліндричній і купольній частинах 3О дорівнюють відповідно 784 і 762 тс (7691 і 7475 кН) (згідно з вимогами до експлуатації СПЗО);

інтенсивність внутрішнього надлишкового аварійного тиску в підоболонковому просторі прийнята рівною 0,4 МПа (замість 0,46 МПа в разі інтегральних випробувань на міцність (розрахунковий режим етапу 1));

враховано внутрішній вплив аварійної температури пароповітряного середовища (150°C) і зовнішній вплив зимової температури повітря довкілля (мінус 30°C).

Розрахунки НДС 3О на етапі 3 розбито на два етапи — 3.1 і 3.2.

Аналогічно до розрахункового дослідження на етапі 1 моніторинг зміни параметрів НДС 3О при моделюванні зростання аварійних параметрів (для побудови діаграм на рис. 17—19) здійснювався в контрольних точках 3О, положення яких відображено на рис. 3, а координати — в табл. 1 та 2.

Етап 3.1. Розрахунок НДС 3О від термомеханічних впливів в аварійних умовах для усталеного (стаціонарного) процесу теплопередачі складався з двох окремих досліджень-розрахунків:

розрахунку розподілу температури в стінці 3О для випадку усталеного (стаціонарного) процесу теплопередачі;

розрахунку параметрів НДС 3О від сукупності механічних (силових) і температурних (визначених за результатами попереднього розрахунку) впливів.

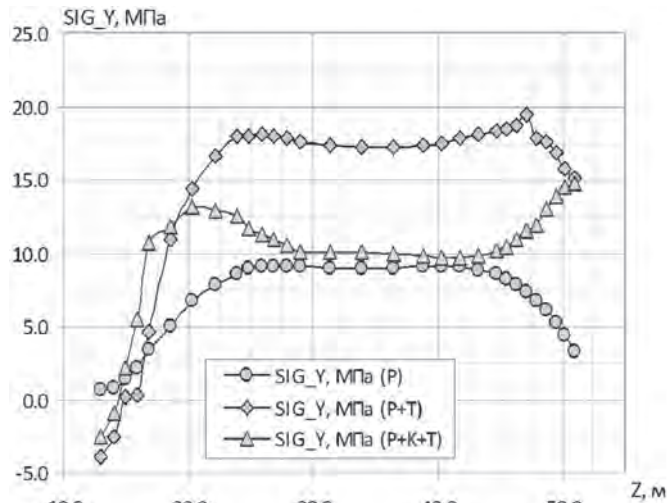


Рис. 17. Меридональні напруження в 3О від власної ваги, обтиснення армоканатами СПЗО (К), внутрішнього надлишкового аварійного тиску (P) та температури (T): циліндрична частина

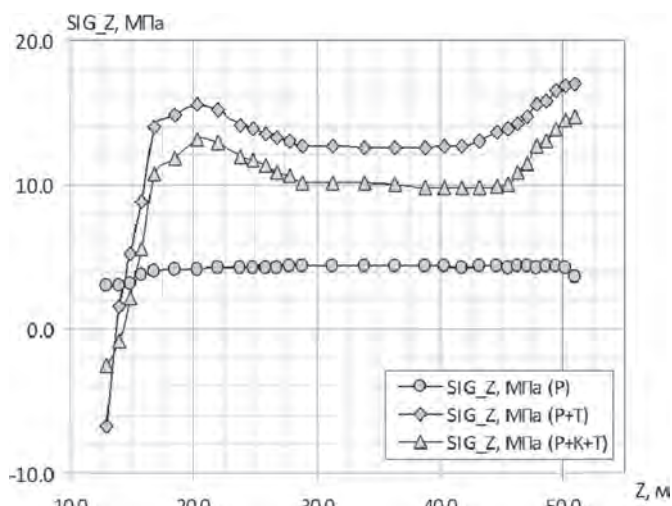


Рис. 18. Колові напруження в 3О від власної ваги, обтиснення армоканатами СПЗО (К), внутрішнього надлишкового аварійного тиску (P) та температури (T): циліндрична частина

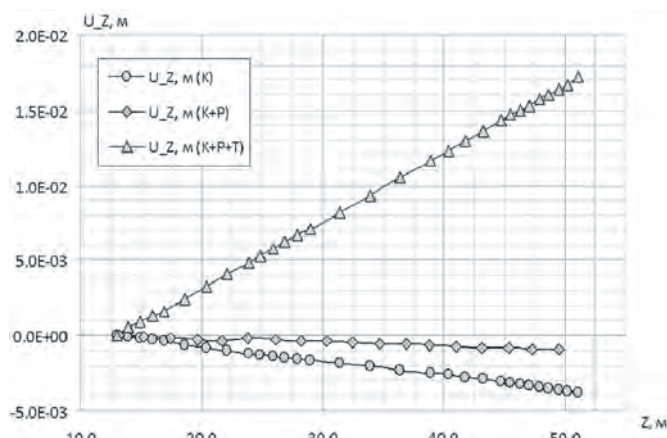


Рис. 19. Вертикальні переміщення в 3О від власної ваги, обтиснення армоканатами СПЗО (К), внутрішнього надлишкового аварійного тиску (P) та температури (T): циліндрична частина

За результатами розрахунків НДС ЗО на етапі 3.1, наведеними на рис. 17–21, маємо:

напруження в ЗО від спільного впливу аварійного тиску і температури певною мірою компенсують напруження, спричинені обтисненням ЗО армоканатами СПЗО (рис. 17, 18);

інтенсивність напружень у бетоні (рис. 20) практично по всій поверхні ЗО перевищує розрахунковий опір бетону на розтяг 1,2 МПа, що обумовлює виникнення і розвиток у бетоні ЗО процесу тріщиноутворення;

інтенсивність напружень у ГСО (рис. 21) практично по всій поверхні гермооблицювання перевищує границю пластичності 230 МПа, що може розглядатись як передумова порушення щільності ГСО (внаслідок виникнення тріщин у сталевих листах, розриву зварних швів тощо) і подальшої втрати захисної оболонкою локалізуючої функції.

Узагальнені результати розрахунку параметрів НДС ЗО енергоблока АЕС в аварійних умовах є такими:

циліндрична частина, бетон: інтенсивність напружень розтягу $\sigma_{i_бет} = 1,24 \dots 18,20 > 1,2$ МПа = $[\sigma]$ перевищує розрахунковий опір матеріалу; в матеріалі відбувається розвиток процесу тріщиноутворення;

куполна частина, бетон: інтенсивність напружень розтягу $\sigma_{i_бет} = 1,24 \dots 9,72 > 1,2$ МПа = $[\sigma]$ перевищує розрахунковий опір матеріалу, в матеріалі відбувається розвиток процесу тріщиноутворення;

циліндрична та купольна частини, ГСО: інтенсивність напружень у більшій частині ГСО $\sigma_{i_ГСО} \geq 243$ МПа > 230 МПа = $[R_p]$ значно перевищує границю пластичності матеріалу; в матеріалі розвиваються деформації пластичності; запас несучої здатності ГСО (резерв зростання напружень у матеріалі) відсутній.

Результати розрахунків, які свідчать на користь розвитку в ГСО в аварійних умовах деформацій пластичності, узгоджуються з наведеними в [18] результатами відповідних розрахунків ЗО за допомогою ПЗ «ЛИРА» [19], щодо яких у [18] надано такий висновок: у ГСО «в процесі проходження аварії сжимаючі напруження зростають

и превышают напряжения, при которых происходит потеря устойчивости. В стали ГСО развиваются деформации текучести». Також у [18] вказано, що «Разрушения гермооблицовки не происходит. Герметичность ГСО обеспечивается», але зазначене твердження не супроводжено будь-якими обґрунтуваннями або поясненнями, які доводять його достовірність (реалістичність).

На користь виникнення й розвитку в ГСО в аварійних умовах деформацій пластичності також свідчить наведений далі спрощений інженерний розрахунок.

Температурні напруження σ_T в панелі ГСО для випадку двовимірного напруженого стану визначаються залежністю

$$\sigma_T = E \cdot (T_0 + \Delta T) \cdot \alpha \cdot (1 + \nu),$$

де $E = 206000$ МПа — модуль пружності матеріалу ГСО; $T_0 = 20^\circ\text{C}$ — температура монтажу (з'єднання) компонентів ГСО; ΔT — підвищення температури матеріалу ГСО понад температуру монтажу в аварійних умовах; $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ — коефіцієнт температурного розширення матеріалу ГСО; $\sigma_T = R_p = 230$ МПа — границя пластичності матеріалу ГСО; $\nu = 0,30$ — коефіцієнт Пуассона матеріалу ГСО.

Відповідно, підвищення температури, яке призведе до виникнення в ГСО деформацій пластичності,

$$\Delta T = \frac{\sigma_T}{\alpha \cdot E \cdot (1 + \nu)} - T_0 = \frac{230 \cdot 10^6}{1,22 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot (1 + 0,3)} - 20 = 50,4^\circ\text{C}.$$

Отже, із зростанням температури ГСО вище за $T = T_0 + \Delta T = 20 + 50,4 = 70,4^\circ\text{C}$ у матеріалі ГСО внаслідок надмірних напружень стискання (навіть за умови неврахування напружень, обумовлених попереднім обтисненням ЗО та вагою розташованих вище конструкцій) очікується виникнення

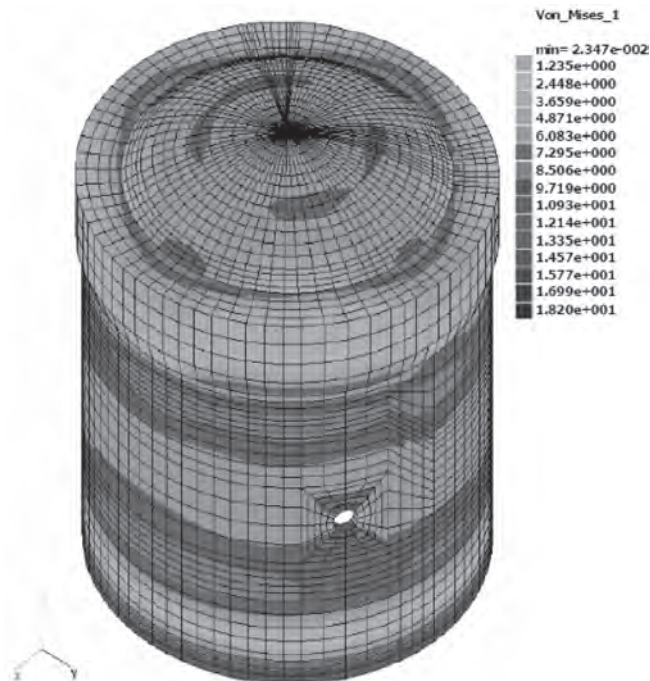


Рис. 20. Інтенсивність напружень у бетоні ЗО в аварійних умовах, МПа

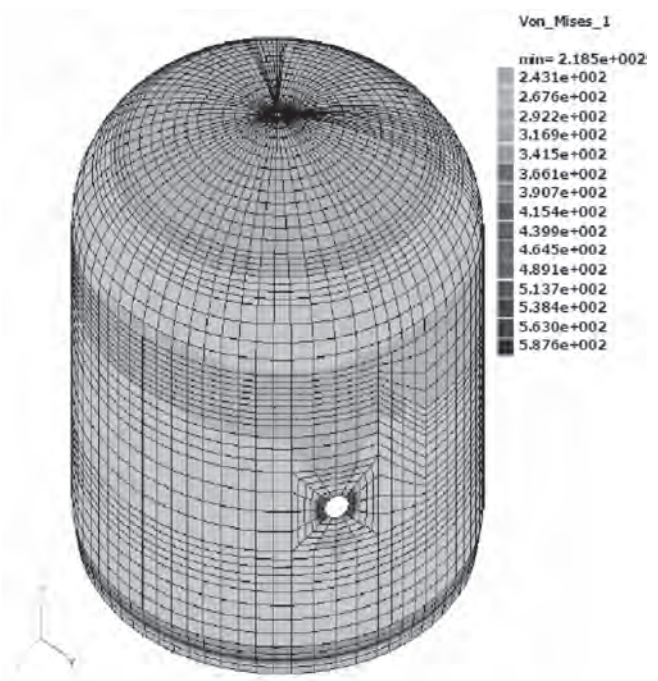


Рис. 21. Інтенсивність напружень у сталевому гермооблицюванні ЗО в аварійних умовах, МПа

й розвиток деформацій плинності. Цей прогноз узгоджується з результатами розрахунків на етапі 3.2 цього дослідження (рис. 22, а, б).

Зазначимо, що отримана на етапі 3.1 інформація про параметри НДС компонентів ЗО від конфігурації термомеханічних впливів в аварійних умовах для усталеного (стаціонарного) процесу теплопередачі не дає уявлення про еволюцію процесу утворення й розвитку (розповсюдження) зон плинності в матеріалі ГСО. З цієї причини для отримання еволюційної картини розповсюдження (розростання) зон плинності в матеріалі ГСО були виконані дослідження на етапі 3.2 розрахункового аналізу.

Етап 3.2. Розрахунок НДС ЗО від термомеханічних впливів в аварійних умовах для перехідного (нестационарного) процесу теплопередачі має такі особливості:

розповсюдження тепла і розподіл температури за товщиною стінки ЗО моделюється залежно від зростання значення керуючого параметра — часу t , який змінюється від 0 до 600 с;

температура пароповітряного середовища в підоболонковому просторі (на внутрішній поверхні ГСО) згідно з реалізованим алгоритмом зростає залежно від керуючого параметра (часу t) в діапазоні від 60 °С (температура нормальної експлуатації РУ) до 150 °С (найвища температура пароповітряного середовища при максимальній проектній аварії).

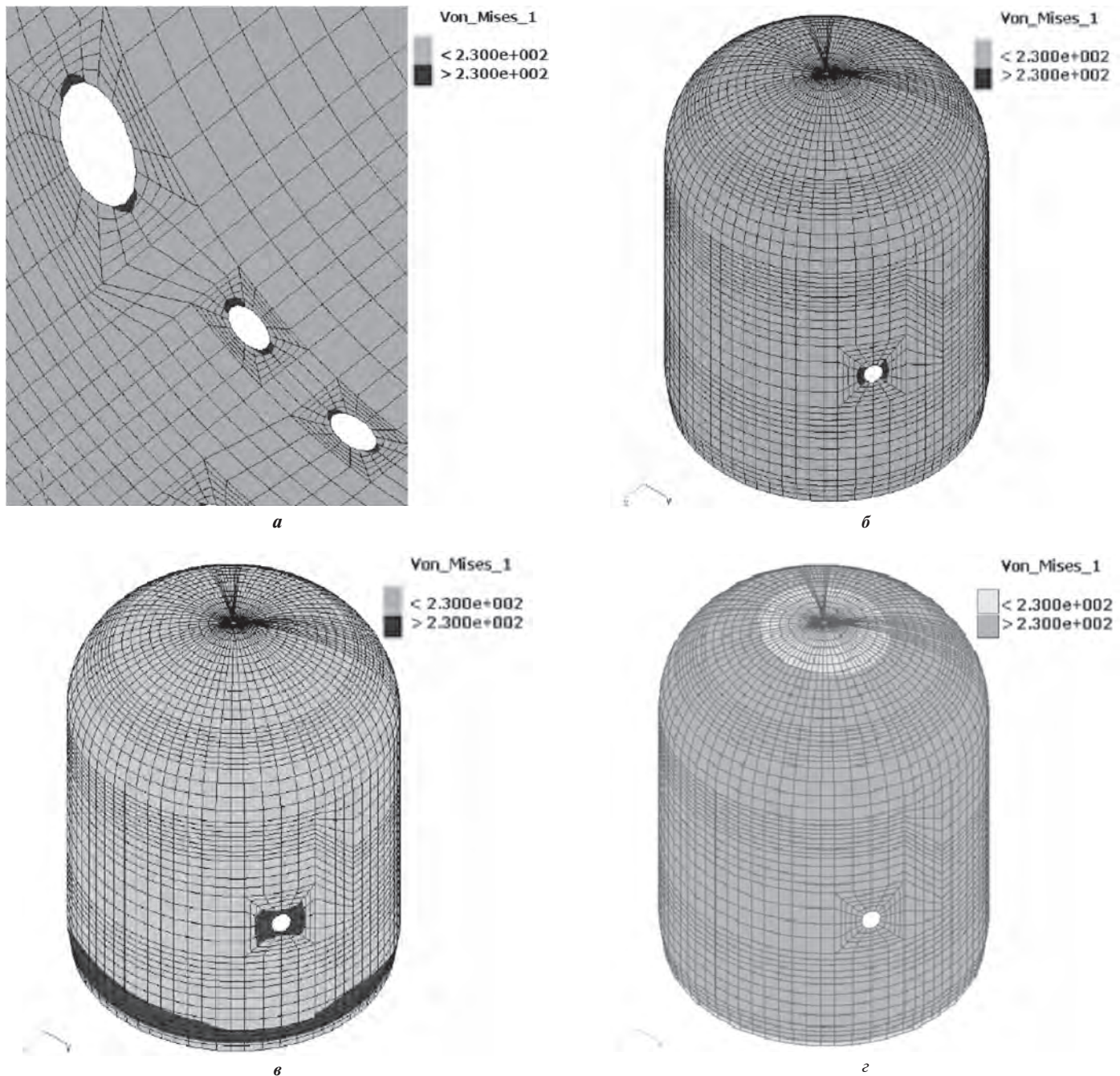


Рис. 22. Інтенсивність напружень, МПа, у гермооблицюванні ЗО АЕС в аварійних умовах:

а — температура ГСО 118 °С, момент часу 10 с; б — температура ГСО 139 °С, момент часу 50 с; в — температура ГСО 147 °С, момент часу 100 с; з — температура ГСО 150 °С, момент часу 600 с

Відповідно до результатів розрахунку, розвиток деформацій плинності в ГСО розпочинається в зонах ЗО, прилеглих до технологічних отворів (зон розташування люків, основних технологічних проходок тощо) в проміжок часу $t=10...50$ с ($T=118...139^\circ\text{C}$), тобто практично одразу після реалізації вихідної події аварії (рис. 22, а, б); у подальшому виникає й розвивається також у зоні, прилеглій до опорного потовщення, яке забезпечує з'єднання циліндра ЗО з опорною плитою на позначці 13.200 м (рис. 22, в) у проміжок часу $t=50...100$ с ($T=139...147^\circ\text{C}$); надалі розповсюджується по всій поверхні ГСО за винятком локальної кругоподібної зони, прилеглої до вершини купола (рис. 22, г), в проміжок часу від $t=100$ с до $t=600$ с (момент завершення розрахункового періоду часу, $T=147...150^\circ\text{C}$).

Висновки

За допомогою ПЗ «АПРОКС» виконано поетапне розрахункове дослідження термомеханічного стану ГСО захисної оболонки енергоблока АЕС з РУ ВВЕР-1000/В-320 в аварійних умовах:

етап 1. Розрахунок НДС ЗО в нормальних важких умовах експлуатації (режим інтегральних випробувань на міцність);

етап 2. Верифікація реалізованих у ПЗ «АПРОКС» схеми МСЕ, розрахункової МСЕ-моделі ЗО і обчислювальних алгоритмів;

етап 3. Розрахунок НДС ЗО в аварійних умовах (режим максимальної проектно аварії), зокрема:

етап 3.1. Розрахунок НДС ЗО від термосилових впливів в аварійних умовах для усталеного процесу теплопередачі;

етап 3.2. Розрахунок НДС ЗО від термосилових впливів в аварійних умовах для перехідного процесу теплопередачі.

Згідно з результатами розрахунків, в аварійних умовах у ГСО відбуваються деформації плинності: початково в зонах, прилеглих до технологічних отворів, а в подальшому — в припорній зоні ЗО і по всій поверхні ГСО. Зазначені деформації можуть спричинити відмову ГСО у вигляді втрати нею суцільності (утворення тріщин в основному металі та/або розрив зварних швів). ЗО внаслідок такої відмови потенційно може втратити локалізуючу функцію.

Для остаточного висновку про можливість відмови ГСО в аварійних умовах доцільно [20]:

виконати експериментальне дослідження деформування фрагменту ЗО (залізобетонних конструкцій з ГСО) в умовах, що відповідають максимальній проектній аварії, на предмет збереження цілісності ГСО (зокрема, зварних швів) у разі розвитку в ГСО деформацій плинності, а також дослідження втрати панелями ГСО стійкості під впливом відповідних силових та температурних факторів;

виконати розрахункове моделювання фізично нелінійного деформування (руйнування) бетону ЗО і плинної поведінки матеріалу ГСО на предмет збереження цілісності ГСО (зокрема, зварних швів) у разі розвитку в ГСО деформацій плинності, а також втрати фрагментами гермооблицювання стійкості під впливом відповідних силових та температурних факторів;

проаналізувати локалізуючу здатність (опір проникності) бетону зон ЗО, які мають ознаки розтягу і тріщиноутворення, а також зміну рівня інтегрального витікання радіоактивності із зони локалізації аварій за умови потенційної відсутності ГСО, беручи до уваги природну

пористість і неоднорідність структури бетону, а також накопичені в ньому дефекти структури матеріалу (мікропошкодження), обумовлені змінами температурного режиму експлуатації, нерівномірним обтисненням армоканатами СПЗО і впливом підвищеного внутрішнього тиску при випробуваннях на міцність та щільність;

розробити (за потреби) заходи щодо забезпечення зниження температури ГСО в аварійних умовах, а також обґрунтувати їх ефективність.

Список використаної літератури

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. М. : Госстрой СССР, 1985. 80 с. (Втратив чинність з 01.06.11).
2. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М. : Госстрой СССР, 1981. 90 с. (Втратив чинність з 01.09.11).
3. СНиП II-6-74. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия. М. : Госстрой СССР, 1976. 71 с. (Втратив чинність з 01.01.87).
4. Южно-Украинская АЭС. Блок № 1. Система преднапряжения защитной оболочки (СПЗО). Расчетное обоснование пригодности защитной оболочки к эксплуатации по результатам КНР в 1992 г. 210502.0422142.00001.601 КЖ.Р1. М. : Государственный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и испытательский институт (ГНИППКИИ) «Атомэнергопроект», 1992. 76 с.
5. Zienkiewicz O. C, Taylor R. L. The Finite Element Method. Fifth edition. Volume 2: Solid Mechanics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 459 p.
6. Сахаров А. С., Гуляр А. И., Кислокий В. Н. Исследование устойчивости осесимметричных оболочек с большими перемещениями с учетом физической нелинейности. *Сопротивление материалов и теория сооружений*. К. : Будівельник, 1974. № 6. С. 42—47.
7. Сахаров А. С., Соловей Н. А. Исследование сходимости метода конечных элементов в задачах пластин и оболочек. *Пространственные конструкции зданий и сооружений*. М. : Стройиздат, 1977. Вып. 3. С. 10—15.
8. Гондляр А. В., Мельников С. Л., Сахаров А. С., Платонов К. В., Снитко А. Н. Итерационно-аналитическая теория оболочек в задачах статики и динамики неоднородных структур. *Мат. Всесоюз. науч. семинара «Актуальные проблемы неоднородной механики»*. Ереван, 1991. С. 99—104.
9. Гондляр А. В. Итерационно-аналитическая теория пластин и оболочек. Рукопись деп. в УкрНИИТИ, 1988. № 1212-Ук88.
10. Гондляр А. В. Итерационно-аналитическая теория деформирования многослойных оболочек. *Сопротивление материалов и теория сооружений*. К. : Будівельник, 1988. № 53. С. 33—37.
11. Баженов В. А., Сахаров А. С., Гондляр А. В., Мельников С. Л. Нелинейные задачи механики многослойных оболочек. К. : НДІБМ, 1994. 264 с.
12. Сахаров А. С., Гондляр А. В., Мельников С. Л. Решение геометрически нелинейных задач статики и динамики оболочек на основе метода конечных элементов. *Сопротивление материалов и теория сооружений*. К. : Будівельник, 1990. № 56. С. 38—42.
13. Сахаров А. С., Гондляр А. В., Мельников С. Л. Уточненная теория многослойных композитных оболочек в задачах статики и динамики. *Сопротивление материалов и теория сооружений*. К. : Будівельник, 1986. Вып. 49. С. 26—31.
14. Рождественский В. Б., Барабаш М. С., Шапиро Г. И. Верификационный отчет по программному комплексу «ЛИРА-САПР». Т. I : Основные возможности. Библиотека конечных элементов. Примеры применения. М., 2015. 192 с.
15. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. — 71 с.
16. Канат арматурный для систем преднапряжения защитных оболочек АЭС. Технические условия. ТУ У 0249543-037-96. К. : Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, 10.02.96.

17. Краснощеков Е. А., Сукомел Д. С. Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов. М. : Энергия, 1980. 144 с.

18. Выполнение расчета локализующей системы — системы герметичного ограждения на прочность с учетом текущего технического состояния. Энергоблок № 1 ОП «Запорожская АЭС». 01.ПО.XA\TQ.OT.1054-15. Отчет. — К. : ООО «АЦ «Альгиз», 2015. 210 с.

19. Программный комплекс ЛИРА : Аттестационный паспорт программного средства от 26.05.05 № 193 / НИИАСС Госстроя Украины. М. : Федеральная служба по эколог., технолог. и атом. надзору; Науч.-техн. центр по ядерной и радиационной безопасности, 2005. 4 с.

20. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки документів ВП «Южно-Українська АЕС» «Решение о продлении срока эксплуатации здания реакторного отделения энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС (основания, фундаментов, стен, перекрытий, защитной оболочки) по результатам выполненной оценки технического состояния» і «Техническое решение № _____ «Об испытании на прочность защитной оболочки энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС»» (з додатками) № 14-09-8055. К. : ДНТЦ ЯРБ, 2014. 45 с.

References

1. SNiP 2.03.01-84* (1985), “Concrete and Reinforced Concrete Structures” [Betonnnye i zhelezobetonnye konstruksii], Moscow, USSR Gosstroj, 80 p. (Cancelled on 01 June 2011). (Rus)

2. SNiP II-23-81* (1981), “Steel Structures” [Stalnye konstruksii], Moscow, USSR Gosstroj, 90 p. (Cancelled on 01 September 2011). (Rus)

3. SNiP II-6-74 (1976), “Design Standards. Loads and Hazards” [Normy proektirovaniia. Nagruzki i vozdeistviia], Moscow, USSR Gosstroj, 71 p. (Cancelled on 01 January 1987). (Rus)

4. South Ukraine NPP. Unit 1. Containment Prestressing System. Design Justification of Containment Suitability for Operation According to Results of Control and Prevention Activities in 1992. 210502.0422142.00001.601 KZh.R1 [Yuzhno-Ukrainskaia AES. Blok No. 1. Sistema prednatiazheniia zashchitnoi obolochki (SPZO). Raschiotnoie obosnovaniie prigodnosti zashchitnoi obolochki k ekspluatatsii po rezul'tatam KPR v 1992 g.], Moscow, State Scientific and Research, Design and Survey Institute “Atomenergoproekt”, 1992, 76 p. (Rus)

5. Zienkiewicz, O. C, Taylor, R. L. (2000), “The Finite Element Method. Fifth Edition. Vol. 2: Solid Mechanics”, Oxford, Butterworth-Heinemann, 459 p.

6. Sakharov, A.S., Guliar, A.I., Kislookii, V.N. (1974), “Investigation of Stability of Axisymmetric Shells with Major Displacements Taking into Account Physical Nonlinearities” [Issledovaniie ustoiichivosti osesimmetrichnykh obolochek s bolshymi peremeshcheniiami s uchiotom fizicheskoi nelineinosti], *Strength of Materials and Theory of Structures*, Kyiv, Budivelnyk, No. 6, pp. 42–47. (Rus)

7. Sakharov, A.S., Solovei, N.A. (1977), “Investigation of Convergence of Finite Element Method in Tasks of Plates and Claddings” [Issledovaniie skhodimosti metoda konechnykh elementov v zadachakh plastin i obolochek], *Space Structures of Buildings and Constructions*, Moscow, Stroizdat, No. 3, pp. 10–15. (Rus)

8. Gondliakh, A.V., Melnikov, S.L., Sakharov, A.S., Platonov, K.V., Snitko, A.N. (1991), “Iteration and Analytical Theory of Cladding in Problems of Statics and Dynamics of Inhomogeneous Structures” [Iteratsionno-analiticheskaiia teoriia obolochek v zadachakh statiki i dinamiki neodnorodnykh struktur], *Proceedings of All-Union Scientific Workshop “Relevant Problems of Inhomogeneous Mechanics”*, Yerevan, pp. 99–104.

9. Gondliakh, A.V. (1988), “Iteration and Analytical Theory of Plates and Claddings” [Iteratsionno-analiticheskaiia teoriia plastin i obolochek], Manuscript of Ukrainian Scientific and Research Institute of Scientific and Technical Information and Economic Studies, No. 1212-Uk88. (Rus)

10. Gondliakh, A.V. (1988), “Iteration and Analytical Theory of Multilayer Cladding Deformation” [Iteratsionno-analiticheskaiia teoriia deformirovaniia mnogoslainnykh obolochek], *Strength*

of Materials and Theory of Structures, Kyiv, Budivelnyk, No. 53, pp. 33–37. (Rus)

11. Bazhenov, V.A., Sakharov, A.S., Melnikov, S.L. (1994), “Nonlinear Problems of Mechanics of Multilayer Claddings” [Nelineinye zadachi mekhaniki mnogoslainnykh obolochek], Kyiv, Scientific and Research Institute of Structural Mechanics, 264 p. (Rus)

12. Sakharov, A.S., Gondliakh, A.V., Melnikov, S.L. (1990), “Solution of Geometrically Nonlinear Problems of Statics and Dynamics of Cladding Based on Finite Element Method” [Resheniie geometricheski neklineinykh zadach statiki i dinamiki obolochek na osnove metoda konechnykh elementov], *Strength of Materials and Theory of Structures*, Kyiv, Budivelnyk, No. 56, pp. 38–42. (Rus)

13. Sakharov, A.S., Gondliakh, A.V., Melnikov, S.L. (1986), “Specified Theory of Multilayer Composite Cladding in Problems of Statics and Dynamics” [Utochnionnaia teoriia mnogoslainnykh kompozitnykh obolochek v zadachakh statiki i dinamiki], *Strength of Materials and Theory of Structures*, Kyiv, Budivelnyk, No. 49, pp. 26–31. (Rus)

14. Rozhdestvensii, V.B., Barabash, M.S., Shapiro, G.I. (2015), “Verification Report on LIRA-SAPR Software” [Verifikatsionnyi otchiot po programmnomu kompleksu “LIRA-SAPR”], Finite Element Library, Typical Applications, Moscow, 192 p. (Rus)

15. DBN V.2.6–98:2009. Structures of Buildings and Constructions, Concrete and Reinforced Concrete Structures, Main Provisions [Konstruksii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia], Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2011, 71 p. (Ukr)

16. “Tendons for Prestressing of NPP Containment, Technical Specifications, TU U 0249543-037-96” [Kanat armaturnyi dlia sistem prednapiazheniia zashchitnykh obolochek AES. Tekhnicheskie usloviia. TU U 0249543-037-96], Kyiv, State Scientific and Research Institute of Building Structures, 10 February 1996. (Rus)

17. Krasnoshiokov, E.A., Sukomel, D.S. (1980), “Set of Problems on Heat Transfer, Manual for Higher Educational Establishments” [Zadachnik po teploperedache: Uchebnoie posobiie dlia vuzov], Moscow, Energy, 144 p. (Rus)

18. “Calculation of the Confining System — System of Sealing Guardrail — for Strength Considering Current Technical Condition. ZNPP-1. 01.ПО.XA\TQ.OT.1054-15, Report” [Vypolneniie raschiota lokalizuiushchei sistemy — sistemy germetichnogo ograzdeniia na prochnost s uchiotom tekushchego tekhnicheskogo sostoianiiia. Energblok No. 1 OP “Zaporozhskaia AES”. 01.ПО.XA\TQ.OT.1054-15. Otchiot], Kyiv, Algiz, 2015, 210 p. (Rus)

19. “LIRA Software, Software Certificate No. 193 Dated 26 May 2005” [Programmnyi kompleks LIRA: Attestatsionnyi passport programmnoho sredstva ot 26.05.05 No. 193], Moscow, Federal Service for Environmental, Technology and Nuclear Supervision, Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2005, 4 p. (Rus)

20. “Report on State Review of Nuclear and Radiation Safety of SUNPP Documents “Decision on Lifetime Extension of SUNPP-1 Reactor Compartment Building (Base, Foundation, Walls, Ceiling, Containment) According to Results of Conducted Assessment of the Technical State” and “Technical Decision No. ____ “On Testing of SUNPP-1 Containment Strength”” with Annexes No. 14–09–8055” [Zvit pro vykonanniia derzhavnoi ekspertyzy yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky dokumentiv VP “Yuzhno-Ukrainska AES” “Resheniie o prodlenii sroka ekspluatatsii zdaniia reaktornogo otdeleniia energobloka No. 1 OP YuUAES (osnovaniia, fundamentov, sten, perekrytii, zashchitnoi obolochki) po rezul'tatam vypolnennoi otsenki tekhnicheskogo sostoianiiia” i “Tekhnicheskoe resheniie No. ____ “Ob ispytanii na prochnost zashchitnoi obolochki energobloka No. 1 OP YuUAES”” (z dodatkami) No. 14–09–8055], Kyiv, SSTC NRS, 2014, 45 p. (Rus)

Надійшла 29.12.2016.