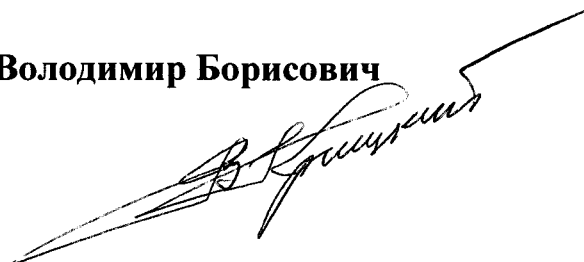


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка**

**Крицький Володимир Борисович**



УДК 539.3;624.042

**Чисельне моделювання динаміки захисних оболонок атомних  
електростанцій при короткочасних навантаженнях**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2016**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор,  
**Луговий Петро Захарович**,  
в.о. завідувача відділом будівельної механіки  
тонкостінних конструкцій Інституту механіки  
ім. С.П. Тимошенка НАН України,

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гайдайчук Віктор Васильович**,  
завідувач кафедри теоретичної механіки Київського  
національного університету будівництва і архітектури;


кандидат технічних наук,  
**Матченко Тарас Іларіонович**,  
провідний інженер відділу автоматизованого  
проектування Публічного акціонерного товариства  
«Київський науково-дослідний та проектно-  
конструкторський інститут «Енергопроект»»

Захист відбудеться « 08 » листопада 2016 р. об 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.166.01 Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України за адресою: 03057, м. Київ-57, вул. Нестерова, 3.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України за адресою: 03057, м. Київ-57, вул. Нестерова, 3.

Автореферат розісланий « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.166.01  
доктор фізико-математичних наук

 О.П.Жук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В даний час оцінка технічного стану захисних оболонок (ЗО) атомних електростанцій (АЕС) виконується методами візуального і інструментального неруйнівного контролю з використанням переносних технічних засобів. Попри високу надійність зазначених технологій, основним їх недоліком є те, що вони можуть бути застосовані виключно під час планово-попереджувального ремонту енергоблоку за умови призупинення функціонування реакторної установки (РУ) і переведення її в режим «холодний останов». Ця обмеженість застосування зазначених технологій контролю технічного стану ЗО, зокрема неможливість їх реалізації в умовах зовнішніх природних і техногенних екстремальних впливів, а також при дії внутрішніх пікових технологічних навантажень (при нормальній експлуатації і в аварійних умовах) є суттєвою мотивацією для створення засобів математичного моделювання напружено-деформованого стану (НДС), оцінки технічного стану ЗО в процесі нормальної експлуатації і в аварійних станах РУ.

На енергоблоках АЕС України з РУ ВВЕР-1000 (13 енергоблоків) реакторні відділення (РВ) розташовані в середині залізобетонних споруд – одинарних попередньо напружених циліндричних ЗО з пологим сферичним куполом. По внутрішній поверхні ЗО влаштоване герметизуюче сталеве гермооблицювання (ГО), яке відповідно до концепції глибокошелюваного захисту РУ, ізолює її від впливу зовнішнього середовища, а також забезпечує локалізацію радіоактивних речовин в підоболонковому просторі при потенційно можливих аварійних подіях в РВ. Для розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) і динаміки ЗО можливо використання відомої теорії дискретно підкріплених шаруватих оболонок і теорії оболонок на пружній основі. Але розроблені на основі цих теорій методи аналізу не є зручними для практичної реалізації і достатньо ефективними для досліджень НДС і динамічної поведінки ЗО, які є складними комбінованими оболонковими конструкціями з низкою локальних геометричних і конструктивних особливостей. Тому для розрахунку НДС і динаміки ЗО є актуальним і більш результативним розвиток існуючих і створення нових схем методу скінчених елементів з подальшою їх реалізацією у вигляді ефективних проблемно- і об'єктно-орієнтованих програмних засобів (ПЗ) для ЕОМ. Наявність таких ПЗ надає можливість розв'язання **актуальних задач** аналізу НДС і динамічної поведінки ЗО в умовах постульованих максимальної проектної і запроектних аварій (МПА і ЗПА).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності до програм і планів наукових робіт Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України за наступними науковими темами: «Коливання та стійкість гладких та дискретно підкріплених циліндричних оболонок при статичних та імпульсних навантаженнях» (шифр № 3 1.3.1.392-14 № ДР 0114U0021642014 – 2015 рр.) та «Дослідження механічної поведінки неоднорідних анізотропних елементів сучасних конструкцій складної структури за допомогою нових підходів на основі різних моделей» (шифр № 1.3.1.382-12, № ДР 0102U000249 – 2016 рр.).

**Мета і задачі роботи.** Метою роботи є аналіз НДС і динамічної поведінки ЗО, а також оцінка працездатності споруди при нестационарних короткочасних

динамічних навантажень в умовах потенційно можливих максимальної проектної та/або запроектних аварій. Досягнення мети дослідження здійснюється шляхом вирішення наступних задач:

- аналіз існуючих проблем оцінки працездатності ЗО енергоблоків АЕС України, що експлуатуються, при екстремальних природних і технологічних динамічних впливах в аварійних умовах;
- визначення нормативно узгоджених критеріїв міцності і працездатності ЗО (як локалізуючої системи безпеки) при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах максимальної проектної і запроектних аварій;
- розробка на основі теоретично обґрунтованої і практично апробованої схеми МСЕ методології розрахункового моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА;
- розробка програмного засобу, який реалізує розроблену методологію моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА;
- розробка розрахункової МСЕ-моделі ЗО, яка враховує її реальні (проектні) геометричні розміри (зокрема, розміри технологічних отворів (люків/шлюзів, проходок), потовщень конструкції в зонах отворів, анкерного карнизу, підкранової консолі, з'єднання циліндричної частини ЗО з опорною плитою), фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів, граничні і початкові умови тощо;
- розробка і програмна реалізація математичних моделей (функцій) розподілу в просторі (по поверхні/об'єму ЗО) та/або в часі розрахункових силових навантажень на ЗО – власної ваги конструкцій і технологічного обладнання, зусиль від переднапруження з врахуванням узагальненого коефіцієнта тертя між армоканатами (АК) і каналоутворювачами, стрибка аварійного тиску пароповітряного середовища в ГО, впливу проектного землетрусу при МПА і повітряної ударної хвилі від вибуху воднево-повітряної суміші в ГО при ЗПА тощо;
- розрахункове моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО з застосуванням методу прямого динамічного аналізу і редуційованої МСЕ-моделі великорозмірної відповідальної споруди (ЗО) для спільної дії аварійних технологічних (тиск, вибух) і екстремальних природних (землетрус) динамічних впливів;
- розробка висновків щодо працездатності (збереження локалізуючої функції) ЗО при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА, а також розробка рекомендацій щодо забезпечення працездатності ЗО протягом проектного і понадпроектного терміну експлуатації енергоблоків АЕС;

*Об'єктом досліджень* є напружено-деформований стан одинарних ЗО енергоблоків АЕС, які знаходяться під дією власної ваги, зусиль переднапруження, внутрішнього аварійного тиску пароповітряного середовища в ГО, а також короткочасних динамічних навантажень (проектного землетрусу, впливу повітряної ударної хвилі від вибуху водню в ГО);

*Предметом наукового дослідження* є НДС, а також вимушені і вільні коливання ЗО при дії на ЗО власної ваги, зусиль переднапруження, внутрішнього аварійного тиску пароповітряного середовища в ГО, а також короткочасних динамічних навантажень (проектного землетрусу, впливу повітряної ударної хвилі від вибуху водню в ГО).

*Методи досліджень.* В основу розробленої методології теоретичного дослідження НДС і коливань ЗО покладено коректна реалістична (така, що відповідає проекту ЗО); моделювання досліджуваного об'єкту; НДС і динаміки ЗО здійснюється за допомогою апробованої схеми методу скінчених елементів (МССЕ); з застосуванням принципу суперпозиції, досліджено НДС ЗО при спільній дії власної ваги, зусиль переднапруження, внутрішнього аварійного пароповітряного середовища тиску в ГО, а також короткочасних динамічних навантажень (проектного землетрусу, впливу повітряної ударної хвилі від вибуху водню в ГО); на основі критерію Мізеса визначені слабкі місця ЗО; розроблена методологія теоретичного дослідження НДС і коливань ЗО реалізована у вигляді програмного засобу (ПЗ) «ДПРОС», з використанням якого здійснено моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що наведена і розглянута уточнена постановка задач щодо динамічної поведінки ЗО при дії короткочасних екстремальних динамічних впливах в аварійних умовах, зокрема:

- виконано аналіз існуючих проблем оцінки працездатності ЗО енергоблоків АЕС України, що експлуатуються, при екстремальних природних і технологічних динамічних впливах в аварійних умовах;

- визначені нормативно узгоджені критерії міцності і працездатності ЗО (як локалізуючої системи безпеки) при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах максимальної проектної і запроектних аварій;

- розроблено на основі теоретично обґрунтованої і практично апробованої схеми МСЕ методології розрахункового моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА – математичного апарату для моделювання НДС і динамічної поведінки тонкостінних конструкцій на підставі застосування комбінованих (змішаних) редуційованих МСЕ-моделей, утворених з використанням притаманних вихідній МСЕ-моделі форм власних коливань і векторів Ланцоша;

- створено програмний засіб «ДПРОС», який реалізує розроблену методологію моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО при короткочасних екстремальних динамічних впливах в умовах МПА і ЗПА;

- розроблено і програмно реалізовано деталізовану, максимально геометрично і структурно наближену до реальної споруди (порівняно з попередніми відомими проектними і дослідницькими розробками) розрахункову МСЕ-модель залізобетонної споруди ЗО, яка враховує її реальні (проектні) геометричні розміри (зокрема, розміри технологічних отворів (люків/шлюзів, проходок), потовщень конструкції в зонах отворів, анкерного карнизу, підкранової консолі, з'єднання циліндричної частини ЗО з опорною плитою), фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів, граничні і початкові умови тощо;

- розроблено і програмно реалізовано математичні моделі (функції) розподілу в просторі (по поверхні/об'єму ЗО) та/або в часі розрахункових силових навантажень на ЗО – власної ваги конструкцій і технологічного обладнання, зусиль переднапруження з врахуванням узагальненого коефіцієнта тертя між армоканатами (АК) і каналотворювачами, стрибка аварійного тиску пароповітряного середовища

в ГО, впливу проектного землетрусу при МПА і повітряної ударної хвилі від вибуху воднево-повітряної суміші в ГО при ЗПА тощо;

- вперше виконано розрахункове моделювання НДС і динамічної поведінки ЗО з застосуванням методу прямого динамічного аналізу і редуційованої МСЕ-моделі великорозмірної відповідальної споруди (ЗО) для спільної дії аварійних технологічних (тиск, вибух) і екстремальних природних (землетрус) динамічних впливів;

- вперше досліджено (враховано) вплив на НДС і коливання ЗО вторинних (відбитих) вибухових хвиль і хвиль від стрибка тиску (проаналізовано процес «розкачування» споруди).

**Достовірність отриманих в роботі результатів** – результатів розрахунків НДС і динамічної поведінки ЗО забезпечується:

- теоретичним обґрунтуванням збігу застосованої схеми МСЕ;
- точним і детальним моделюванням геометрії і внутрішньої структури конструкцій ЗО, коректним (реалістичним) врахуванням фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів;

- застосуванням МСЕ-моделі із оптимальним співвідношенням розмірів скінчених елементів, за яких забезпечується найкраща апроксимація параметрів НДС функціями напружень і деформацій;

- обґрунтуванням оптимальності застосованої МСЕ-мережі обчислювальними експериментами;

- використанням шагу інтегрування рівнянь руху, який забезпечує стабільність обчислювального процесу і збіг результатів розрахунку;

- перевіркою практичного збігу обчислювального процесу здійсненням серії контрольних розрахунків;

- верифікацією розробленої методики і розрахункової МСЕ-моделі шляхом порівняння результатів розрахунків ЗО з тестовими задачами, що мають аналітичні рішення, з результатами розрахунків іншими (альтернативними) програмними засобами, з результатами натурних спостережень за спорудою ЗО при інтегральних передексплуатаційних випробуваннях ЗО на міцність.

**Практичне значення одержаних результатів.** Теоретична цінність отриманих у роботі результатів полягає в тому, що розроблені математична модель, алгоритми та програмне забезпечення можуть бути застосовані для аналізу НДС і динамічної поведінки ЗО розглянутого проекту, так і ЗО інших проектів (конструкцій) з визначенням їх потенційної працездатності. Використання розроблених алгоритмів МСЕ дозволяє здійснювати розрахунки ЗО з метою:

- оцінки дотримання меж міцності та/або несучої здатності елементів конструкцій;

- оцінки меж застосування більш простих теорій і спрощених інженерних підходів;

- проектування ефективних багатопарових оболонкових конструкцій, здатних сприймати технологічні та природні впливи екстремальної інтенсивності без здійснення високо затратних пошукових експериментальних та натурних досліджень.

Практичне значення отриманих у роботі результатів полягає в тому, що:

- запропоновані підходи до розв'язання реальних задач динаміки при

нестационарних навантаженнях попередньо напружених 3О складної геометрії (утворених циліндричною стінкою з технологічними отворами і сферичним куполом), а також

– розроблені на основі МСЕ методологія, алгоритми і програмний засіб розрахункового розв'язання зазначених задач;

можуть бути застосовані в науково-дослідних та проектно-конструкторських організаціях при розгляді відповідних прикладних задач – для аналізу працездатності проектів нових та/або оцінці технічного стану і працездатності існуючих великорозмірних оболонкових конструкцій і споруд – зокрема з метою розробки інженерних рішень, спрямованих на зменшення імовірності виникнення і мінімізацію негативних наслідків потенційно можливих аварійних ситуацій. Зазначене практичне значення результатів роботи підтверджується документами про їх впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Автором визначені мета і задачі дослідження, сформульовані наукові положення дисертації: розроблена і практично реалізована методологія досліджень і розв'язані задачі моделювання НДС і коливань 3О при короткочасних аварійних навантаженнях. З допомогою розробленого і вдосконаленого автором (відповідно до задач роботи) програмного комплексу «ДППРОС», здійснено чисельне моделювання конструкцій 3О АЕС при короткочасних навантаженнях [1-3], розглянуті задачі з визначення сейсмостійкості споруд АЕС [4-9], також розглянуті задачі з моделювання динамічної поведінки і аналізу НДС та працездатності (збереження локалізуючої функції) 3О в умовах МПА і проектного землетрусу, а також в умовах ЗПА і вибуху повітряно-водневої суміші в РВ; для випадку вибуху повітряно-водневої суміші у РВ реалізована ідея врахування взаємодії ударних хвиль.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи частково і повністю доповідалися на семінарах відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України; повністю робота доповідалась на науковому семінарі за напрямком «Механіка оболонкових систем» при Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. Частково матеріали дисертації доповідалися на міжнародних конференціях

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 18 робіт, зокрема, 6 статей у науковометричних фахових виданнях [2-5, 8, 10], 5 статей у фахових журналах і збірках України [1, 6-7, 9, 11], 7 робіт у збірках матеріалів і праць міжнародних наукових конференцій [12-18].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 187 найменувань на 18 сторінках, містить 27 рисунків і 3 таблиці на 18 сторінках, 2 додатки на 2 сторінках. Повний обсяг роботи становить 142 сторінки.

Автор висловлює щире подяку своєму науковому керівникові доктору технічних наук, професору, Заслуженому діячу науки і техніки України П.З. Луговому за постійну допомогу та корисні поради при написанні дисертаційної роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито суть і стан науково-технічної задачі, обґрунтовано актуальність теми дисертації, викладено мету роботи та сформульовано основні положення, що виносяться на захист, практичне значення та наукову новизну результатів дисертаційної роботи. Наводяться дані щодо апробації та структури роботи.

В першій главі описуються особливості неоднорідних оболонок, які є відповідальними елементами багатьох сучасних конструкцій. Тому чисельному дослідженню напружено-деформованого стану і коливань оболонок присвячена значна кількість робіт відомих вчених, зокрема: В.З.Власова, А.С.Вольміра, О.М.Гузя, Я.М.Григоренка, В.Д.Кубенка, В.А.Баженова, В.І.Гуляєва, В.В.Гайдайчука, В.Н.Кіслоокого, М.О.Солов'я, В.К.Цихановського, О.Л.Козака, В.Г.Карнаухова, М.А.Ільгамова, В.І.Пожуєва, О.О.Рассказова, Є.Г.Янютіна, А.К. Noor та інших.

Дослідження в області динаміки шаруватих і підкріплених оболонок знайшли своє місце в роботах: І.Я.Аміро, О.В.Гондляха, О.Я.Григоренка, Ю.П.Жигалко, В.О.Заруцького, О.І.Лиходіда, П.З.Лугового, Л.І.Маневича, В.Ф.Мейша, А.Д.Легостаєва, Т.І.Матченка, О.С.Сахарова, N.J Pagano та інших.

Аналіз цих робіт показує, що автори досліджень прагнуть якомога точніше враховувати особливості, які притаманні реальним конструкціям ЗО в експлуатаційних умовах. Незважаючи на достатню кількість робіт по дослідженню поведінки ЗО при аварійних ситуаціях, багато питань вимагають свого вирішення.

На основі аналізу виконаного літературного огляду сучасного стану проблеми НДС і коливань ЗО в експлуатаційних умовах і при аварійних навантаженнях, визначено місце даної роботи серед проведених раніше розробок і обґрунтовано вибір напрямків досліджень.

В другій главі викладено постановку задачі дослідження НДС і коливань ЗО при короткочасних аварійних навантаженнях і дії сил гравітації з допомогою МСЕ. ЗО складається з циліндричної (вертикальна стіна товщиною 1.2 м) і сферичної (покриття-купол товщиною 1.1 м) оболонок шаруватої структури – зовнішній шар попередньо напруженого залізобетону і внутрішній шар – герметизуюче сталеве облицювання (ГСО) товщиною 8 мм (Рис. 2.1).

Також в розділі наведені геометричні і фізико-механічні параметри ЗО, на яку діє стрибок тиску від аварії в РО і одночасно з піком тиску діє хвиля від землетрусу. Критерієм відмови ЗО (втрата локалізуючої функції) є втрата цілісності ГСО. Умовою досягнення вказаного критерію прийнято рівність інтенсивності напружень ГСО (сталь ВСтЗсп5) – межа плинності металу  $\sigma_T = 245.0$  МПа. Вказана умова має вигляд умови плинності Губера – Мізеса – Генки у вигляді:

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} / \sqrt{2} \geq \sigma_T,$$

де  $\sigma_T$  – межа плинності матеріалу;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – нормальні і дотичні напруження в матеріалі.



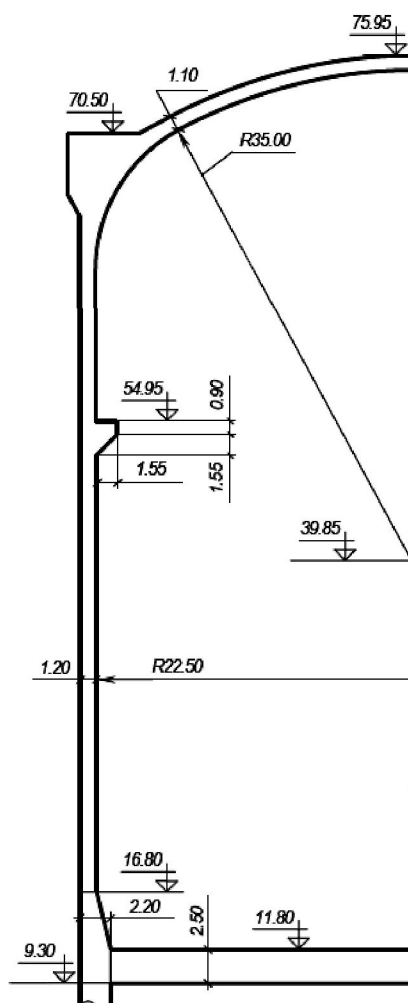


Рис.2.1

Враховуючи особливості задачі для аналізу НДС і динамічної поведінки ЗО в аварійних умовах був застосований метод скінчених елементів (МСЕ), якому притаманні інженерна наочність, можливість необхідного ступеню деталізації розрахункових моделей, алгоритмічність тощо. По товщині ЗО моделювалася 4-ма шарами СКЭ (3 зовнішні шари бетону і 1 внутрішній шар металу, що моделює ГСО – див. Рис. 2.2 ... Рис.2.4).

Прийнято, що в границях об'єму одного скінченого елемента (СЕ) матеріал ЗО є ізотропним. Характеристики шарів стінки ЗО, прийняті в розрахунках, наведені в Табл. 2.1.

Розрахункова багатофрагментна МСЕ-модель ЗО утворена регулярною в межах кожного фрагмента мережею скінчених елементів. Розглянемо оболонку як тривимірне тіло, обмежене двома граничними і контурною поверхнями, яке знаходиться під дією об'ємних і поверхневих навантажень. Розв'язувальні рівняння для оболонок отримаємо в тензорній формі на основі співвідношень теорії пружності. Застосування тензорного апарату дозволяє в компактній формі викласти основні співвідношення при розробці методики розрахунку, а при її чисельній реалізації дозволяє створити ефективні алгоритми. В якості базисної (глобальної) застосовується декартова система координат. Вибір місцевої системи координат виконується окремо для кожного скінченого елемента. Зв'язок між базисною і місцевою системою координат реалізується з допомогою тензора перетворень однієї

системи координат в іншу.

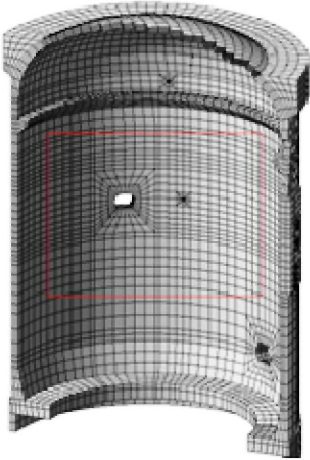


Рис. 2.2

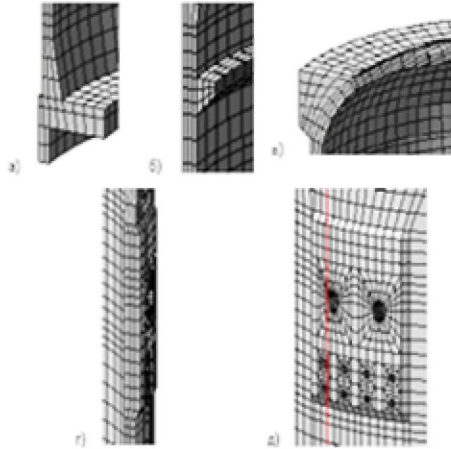


Рис. 2.3

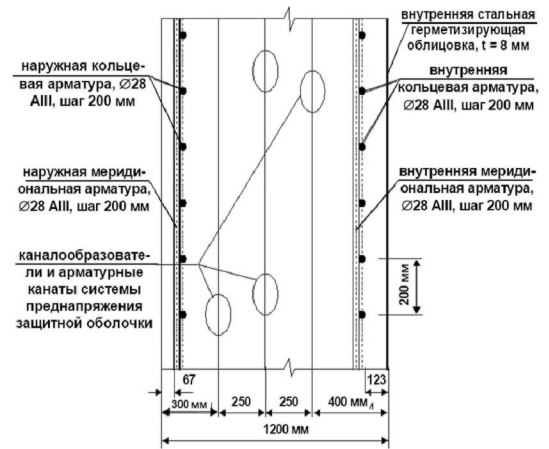


Рис. 2.4

Табл. 2.1

№ шару	Конструктивні особливості шару	Внутрішній радіус і товщина шару, м	Приведені розрахункові фіз.-мех. характеристики матеріалу шару	
			Модуль пружності $E_{сл.пр.}$ , МПа	Коефіцієнт Пуассона $\nu_{сл.пр.}$
1	Металеве гермооблицювання – сталевий лист	22.500 0.008	206000	0.300
2	Залізобетон – бетон, внутрішня кільцева і меридіональна ненапружена арматура	22.508 0.280	33976	0.2052
3	Залізобетон – бетон, каналоутворювачі, армоканати СПЗО	22.788 0.724	31187	0.2099
4	Залізобетон – бетон, зовнішня кільцева і меридіональна ненапружена арматура	23.512 0.188	34740	0.2077

Розробка пакета програм динаміки і міцності оболонкових систем (ДППРОС).

При отриманні співвідношень МСКЭ відобразимо область  $V$ , яка займана елементом, на куб з одиничними ребрами, в центр якого помістимо початок локальної системи координат  $(x^1, x^2, x^3)$ , спрямувавши її вісі вздовж ребер, причому координата  $x^1$  направлена по товщині оболонки (Рис. 2.5). Виразимо переміщення в середині скінченного елемента  $Z^{b'}$  через декартові координати вузлів СЕ при допомозі однорідних поліномів Лагранжа

$$Z^{b'} = \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} \prod_{k=1}^3 \left( P_{(k)} x^{(k)} + \frac{1}{2} \right) Z_{P_1 P_2 P_3}^{b'}, \quad (2.1)$$

де  $Z_{P_1 P_2 P_3}^{b'}$  – декартові координати вузлів СЕ,

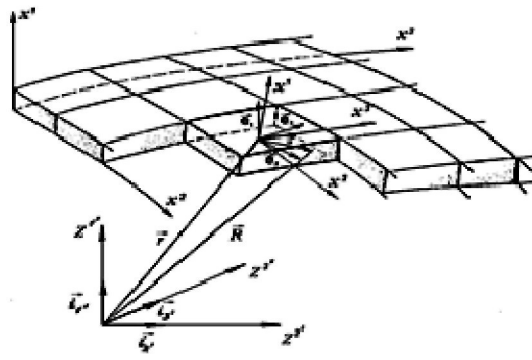


Рис. 2.5

$-1 < x^k < 1$  – координати точки в місцевій системі (Рис. 2.5),

$$P_k = \begin{cases} +1 & \text{при } x^k > 0 \\ -1 & \text{при } x^k < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Для ізопараметричного СЕ при апроксимації переміщень використовуються ті ж вузлові точки і та ж функція форми, що і для апроксимації координат. В якості невідомих приймаємо вузлові переміщення СЕ в декартовій системі координат і полілінійний закон розподілу переміщень в межах СЕ

$$U^{b'} = \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} \prod_{k=1}^3 \left( P_{(k)} x^{(k)} + \frac{1}{2} \right) U_{P_1 P_2 P_3}^{b'} \quad (2.3)$$

де  $U_{P_1 P_2 P_3}^{b'}$  – вузлові переміщення СЕ.

Для прийнятого закону розподілення переміщень в межах СЕ згідно МСКЕ функцію деформацій  $\varepsilon_{ij}$  наведемо у вигляді ряду Маклорена. Наведемо розклад тільки першого доданка  $\varepsilon_{ij}$ :

$$\tilde{C}_j^{k'} \frac{\partial U^{k'}}{\partial x^i} = \zeta_{ij} + \varphi_{ij}^m x^m \omega_{(ij)}^{(mm)} + \psi_{ij}^{mn} x^m x^n \delta_{(j)}^{(i)} \omega_{(mmm)}^{(nii)} \quad (2.4)$$

де значення компонент  $\zeta_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}^k$ ,  $\psi_{ij}^{kl}$  визначаються в центрі О СЕ (Рис. 2.6)

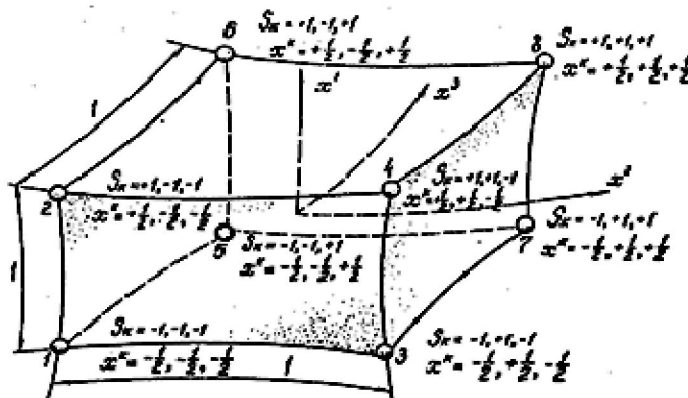


Рис. 2.6

$$\begin{aligned}
\zeta_{ij} &= (\varepsilon_{ij})_0 = \frac{1}{4} \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} \tilde{C}_{j(0)}^{b'} P_i \cdot U_{P_1 P_2 P_3}^{b'} , \\
\varphi_{ij}^k &= \left( \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x^k} \right)_0 = \frac{1}{2} \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} \tilde{C}_{jP(m)}^{b'} P_i P_m \cdot U_{P_1 P_2 P_3}^{b'} , \\
\psi_{ij}^{mn} &= \left( \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x^k \partial x^l} \right)_0 = \frac{1}{2} \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} \tilde{C}_{jP(m)P(n)}^{b'} P_i P_m P_n \cdot U_{P_1 P_2 P_3}^{b'} ,
\end{aligned} \tag{2.5}$$

де  $\tilde{C}_{j(0)}^{b'}$ ,  $\tilde{C}_{jP(m)}^{b'}$ ,  $\tilde{C}_{jP(m)P(n)}^{b'}$  – компоненти тензора перетворень (1.19) в центрі об'єму  $O$ , в центрі грані  $P_m$  і в центрі ребра  $P_m P_n$  СЕ.

Символ Кронекера  $\delta_{(j)}^{(i)}$  і функція  $\omega_{(mnn)}^{(nii)}$  у виразі (2.4) забезпечують врахування «жорстких зміщень»

$$\delta_{(j)}^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases} , \tag{2.6}$$

$$\omega_{mnn}^{nii} = \omega_m^n \omega_m^i \omega_n^i \dots, \quad \omega_m^n = \begin{cases} 1 & \text{при } m \neq n \\ 0 & \text{при } m = n \end{cases} . \tag{2.7}$$

В розгорнутому вигляді вираз (1.30) можна навести, як

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{11} &= \zeta_{11} + \varphi_{11}^2 x^2 + \varphi_{11}^3 x^3 + (\psi_{11}^{23} + \psi_{11}^{32}) x^2 x^2 , \\
\varepsilon_{22} &= \zeta_{22} + \varphi_{22}^1 x^1 + \varphi_{22}^3 x^3 + (\psi_{22}^{13} + \psi_{22}^{31}) x^1 x^3 , \\
\varepsilon_{33} &= \zeta_{33} + \varphi_{33}^1 x^1 + \varphi_{33}^2 x^2 + (\psi_{33}^{12} + \psi_{33}^{21}) x^1 x^2 ,
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$$\varepsilon_{12} = \zeta_{12} + \varphi_{12}^3 x^3, \quad \varepsilon_{13} = \zeta_{13} + \varphi_{13}^2 x^2, \quad \varepsilon_{23} = \zeta_{23} + \varphi_{23}^1 x^1 .$$

Вирази для компонент тензора перетворень  $\tilde{C}_j^{b'}$  отримаємо на підставі відповідних співвідношень

$$\begin{aligned}
\tilde{C}_1^{b'} &= \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} P_1 \left( P_2 x^2 + \frac{1}{2} \right) \left( P_3 x^3 + \frac{1}{2} \right) \left( Z_{P_1 P_2 P_3}^{b'} + \frac{1}{2} U_{P_1 P_2 P_3}^{b'} \right) , \\
\tilde{C}_2^{b'} &= \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} P_2 \left( P_3 x^3 + \frac{1}{2} \right) \left( P_1 x^1 + \frac{1}{2} \right) \left( Z_{P_1 P_2 P_3}^{b'} + \frac{1}{2} U_{P_1 P_2 P_3}^{b'} \right) , \\
\tilde{C}_3^{b'} &= \sum_{P_1=\pm 1} \sum_{P_2=\pm 1} \sum_{P_3=\pm 1} P_3 \left( P_1 x^1 + \frac{1}{2} \right) \left( P_2 x^2 + \frac{1}{2} \right) \left( Z_{P_1 P_2 P_3}^{b'} + \frac{1}{2} U_{P_1 P_2 P_3}^{b'} \right) .
\end{aligned} \tag{2.9}$$

В рядах (2.4-2.8) утримані лише ті члени, які при прийнятому законі розподілу переміщень по об'єму СЕ можуть бути точно визначені. Інше сполучення членів ряду, що відповідає іншим схемам МСЕ, погіршує властивості СЕ і призводить до появи паразитних явищ, таких як наявність деформацій при переміщенні елементів, як жорсткого цілого і «хибний зсув». Аналіз збіжності і стійкості наближених розв'язків наведений у відповідній літературі.

В третій главі наведено опис розроблених обчислювальних алгоритмів розв'язання рівнянь динаміки оболонкових конструкцій (зокрема, ЗО АЕС) та їх програмної реалізації. В якості загального вихідного співвідношення, яке визначає динамічну поведінку довільної механічної системи, зокрема ЗО, прийнято варіаційний принцип Гамильтона – Остроградського, який має наступний математичний запис:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc} dt = 0, \quad (3.1)$$

де:  $T$  – загальна кінетична енергія системи;  $V$  – потенційна енергія системи, яка включає як енергію деформації, так і потенціал любых консервативних зовнішніх сил;  $W_{nc}$  – робота, виконана неконсервативними силами, які діють на систему, включаючи затухання і інші довільні зовнішні навантаження;  $\delta$  – варіація для визначеного часового інтервалу  $t_1 < t < t_2$ .

Використавши принцип Гамильтона – Остроградського (3.1), як вихідне співвідношення, отримуємо наступне рівняння руху, яке описує пружну динамічну поведінку МСЕ-моделі ЗО:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\}, \quad (3.2)$$

де:  $[M], [K]$  – матриці мас і жорсткості МСЕ-моделі ЗО;  $\{\ddot{u}\}, \{u\}$  – вектори вузлових прискорень і переміщень МСЕ-моделі ЗО;  $\{P(t)\}$  – вектор вузлових навантажень МСЕ-моделі ЗО;  $t$  – час.

За допомогою програмного засобу (ПЗ) ДІПРОС, зокрема вдосконалених згідно алгоритмів, які передбачають застосування змішаного базису редуції із власних форм коливань і векторів Ланцоша [3], була чисельно змодельована динамічна поведінка ЗО [1, 2].

Згідно [4-9] для аналізу сейсмостійкості споруд застосовуються: статичний метод розрахунку на сейсмостійкість; лінійно-спектральний метод розрахунку на сейсмостійкість; метод динамічного аналізу сейсмостійкості.

Відповідно був реалізований наступний алгоритм аналізу динамічної поведінки і НДС ЗО при дії стрибка тиску в гермозоні і проектного землетрусу (або іншого динамічного навантаження):

1. Визначення динамічних характеристик ЗО – частот і форм власних коливань;
2. Визначення НДС ЗО, який відповідає формам власних коливань;
3. Визначення суттєво збуджуваних (енергетично містких) форм власних коливань ЗО при дії стрибка тиску в гермозоні і проектного землетрусу (базису редуції), а також амплітуд коливань по вказаних формах;
4. Побудова матриць мас і жорсткості редуційованої МСЕ-моделі ЗО;
5. Моделювання динамічної поведінки редуційованої МСЕ-моделі ЗО, а також – з наперед заданим «моніторинговим» часовим інтервалом – динамічного стану вихідної МСЕ-моделі ЗО;
6. Аналіз можливості відмови (втрати локалізуючої функції) ЗО в умовах досліджуваних динамічних навантажень – по критерію збереження цілісності ГСО.

В **четвертій** главі наведені результати досліджень НДС і динамічної поведінки ЗО при короткочасних навантаженнях в умовах максимальної проектної і запроектних аварій.

При визначенні інтегральних механічних характеристик СЕ ЗО враховується

сила натягу АК і коефіцієнт тертя між АК і каналотворювачем в бетоні згідно СНІП 2.03.01-84.

Процедура завдання навантаження на ЗО від внутрішнього тиску в гермооб'ємі взята стандартною для МСЕ і тому не деталізується. Графік зниження тиску в гермооб'ємі після перпочергового початкового аварійного стрибкоподібного підвищення тиску наведена на Рис. 4.1.

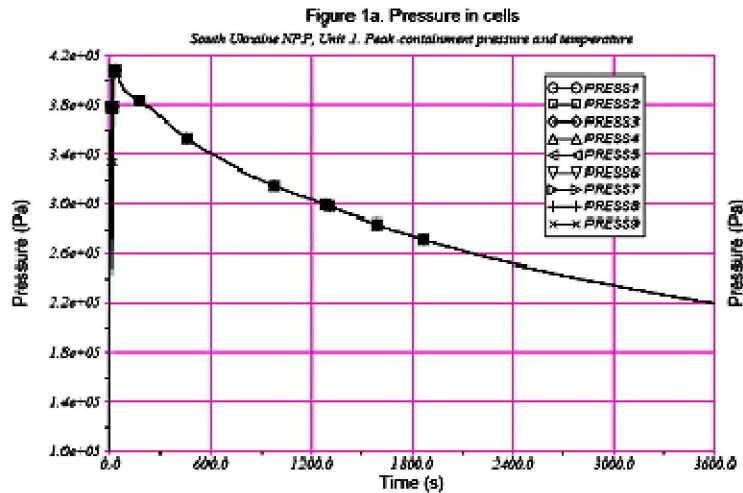


Рис. 4.1.

Для задання сейсмічного впливу на ЗО від проектного землетрусу була використана обцифрована трикомпонентна поверхова (на висотній позначці 11.800 м) акселерограма, яка була отримана за результатами дослідження сейсмічної небезпеки на території розміщення промайданчику АЕС (Рис. 4.2)

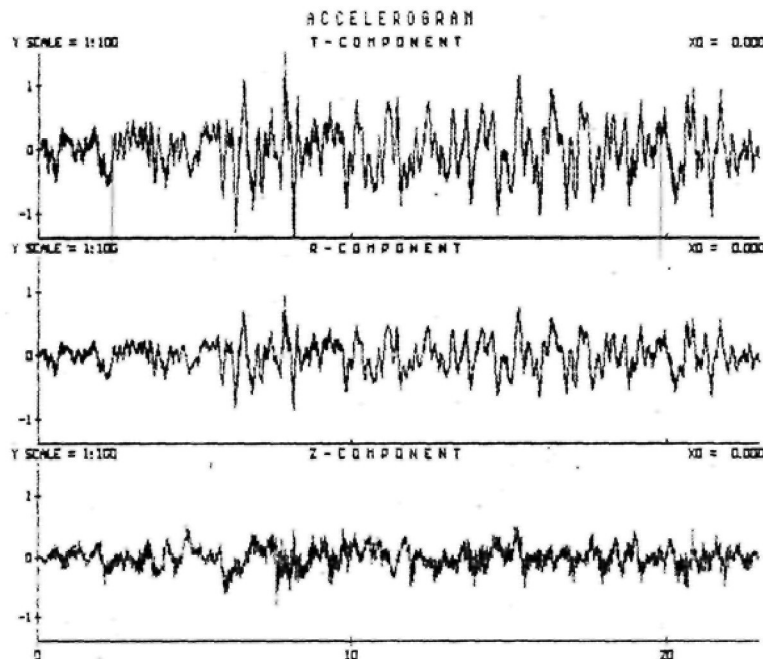


Рис. 4.2

На Рис. 4.3, Рис 4.4 зображено дві найбільш енергоємні (із 100 розрахованих) форми власних коливань ЗО.

Слід зазначити, що для розрахункового аналізу динамічної поведінки ЗО була прийнята МСЕ-модель наступної розмірності: 21062 СЕ, 28547 вузлів,

85641 невідомих системи розв'язувальних рівнянь МСЕ (вузлових переміщень). Як показали результати обчислювальних експериментів при вказаних параметрах МСЕ-моделі практично був досягнутий збіг результатів розрахунків.

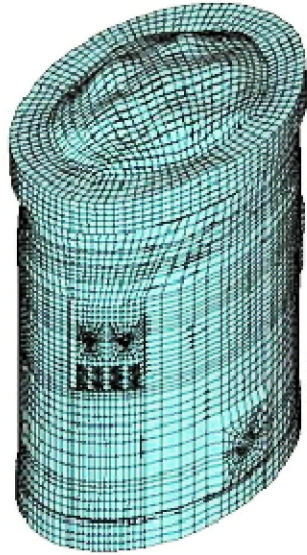


Рис. 4.3

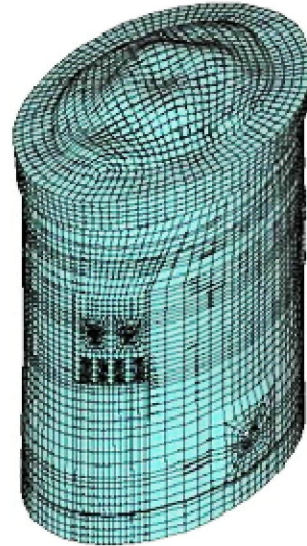


Рис. 4.4

Згідно результатам виконаних розрахунків максимальна інтенсивність напружень в СГО 195.3 МПа, була зареєстрована в момент часу 16.83 с після початку дії землетрусу (який розпочався після стрибка внутрішнього аварійного тиску), в циліндричній частині ЗО, розташованої на 6.2 м вище опорної поверхні циліндра. Деформована форма ЗО, яка відповідає вказаному моменту часу, наведена на Рис. 4.5. а ізополя інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО з відповідними цифровими значеннями інтенсивності в тс/м<sup>2</sup> – на Рис. 4.6.

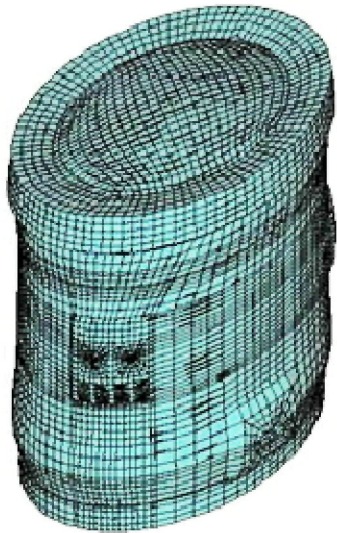


Рис.4.5

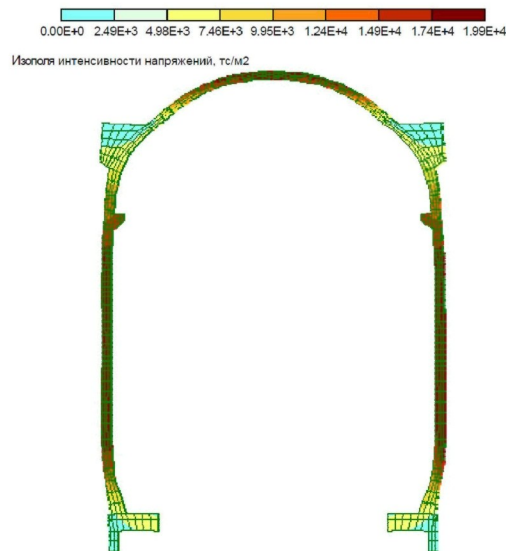


Рис.4.6

Оскільки вказана інтенсивність напружень не перевищує границю плинності матеріалу ГСО  $\sigma=195.3 \text{ МПа} < [\sigma] = 245 \text{ МПа}$ , можна стверджувати, що в умовах сумісної дії аварійного тиску і проектного землетрусу цілісність ГСО (запас несучої здатності ГСО складе -  $(1 - 195.3/245.0) = 20.3\%$ ). Таким чином, працездатність ЗО (виконання спорудою локалізуючої функції) буде забезпечено.

Також в дисертації аналізується НДС і динамічна поведінка ЗО в умовах розвитку запроектованої аварії (ЗПА) «втрата електропостачання власних потреб» при реалізації стрибка тиску пароповітряного середовища в РО і наступної динамічної дії на ЗО хвилі тиску від вибуху водню, поява якого в РО обумовлена протіканням фізико-хімічних процесів в розплаві активної зони аварійної РУ. Критерієм відмови ЗО (втрати локалізуючої функції) є порушення цілісності ГСО. Умовою досягнення вказаного критерію відмови прийнято рівність інтенсивності напружень в матеріалі ГСО границі плинності металу (згідно умові плинності Губера – Мізеса – Генки).

В якості початку виникнення навантаження на ЗО від вибуху водню прийнято момент часу 45000 с після початку аварії, який характеризується максимальною (0.06) концентрацією водню в гермооб'ємі (див. Рис. 4.7).

Відомо, що, при об'ємній концентрації водню 4.1-18.0% виникає дефлаграція (горіння), а при об'ємній концентрації водню 18.0-74.0% – детонація воднево-повітряної суміші. Для розглядуваного в даній роботі випадку (концентрації водню 0.06=6.0%) максимальний тиск на фронті вибухової хвилі при дефлагаційному вибуху водню в гермооб'ємі прийнято, виходячи з залежностей, наведених на Рис.4.8, Рис. 4.9, і складає:

$$p_{\max} = 2.68 \cdot 10^5 \cdot 3 = 8.04 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0.804 \text{ МПа.}$$

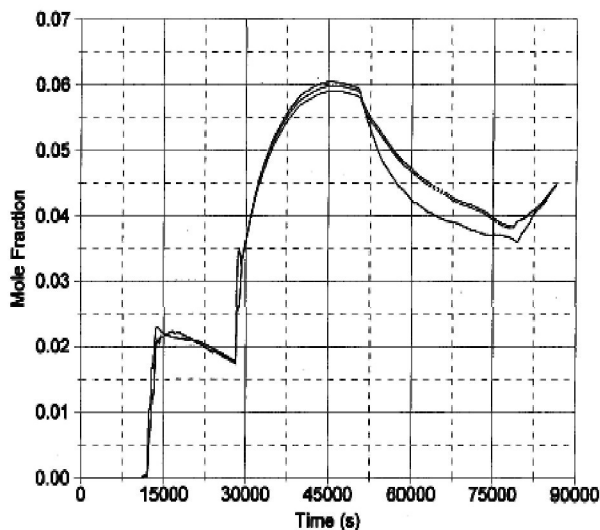


Рис. 4.7

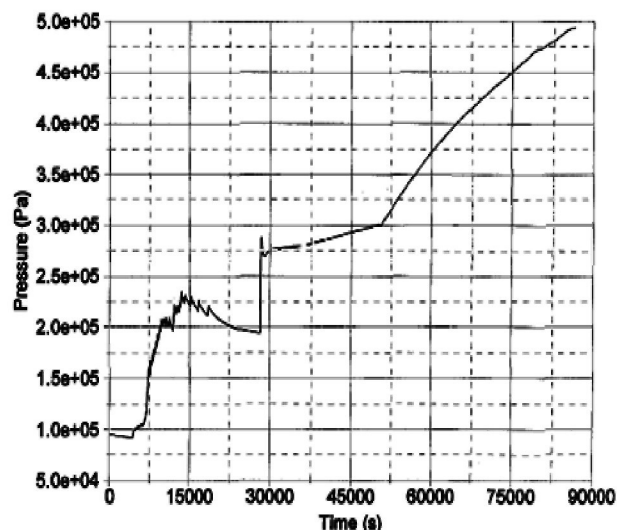


Рис. 4.8

Згідно результатам досліджень вказане значення максимального тиску було відкориговане множенням на коефіцієнт 1.75, який консервативно враховує взаємодію (накладення) падаючої і відбитої ударних хвиль при вибуху в замкненому об'ємі, тобто:

$$p_{\max 1} = 0.804 \cdot 1.75 = 1.407 \text{ МПа} = 13.886 \approx 13.9 \text{ атм.}$$



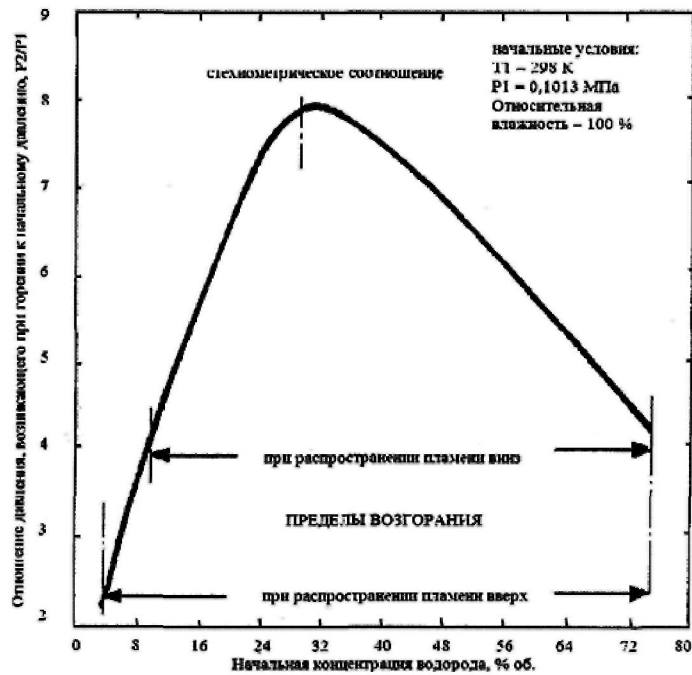


Рис. 4.9

На Рис. 4.9 наведений графік росту тиску при горінні воднево-повітряної суміші в замкнутому об'ємі. На Рис. 4.10 показано розподіл тиску в гермооб'ємі на момент досягнення максимального тиску у вершині купола при миттєвому вибуху в шахті реактора на стінці 30 по осі симетрії гермооб'єму.

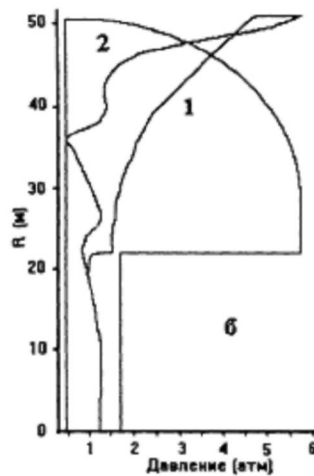


Рис. 4.10

На Рис. 4.11 показано графік зміни тиску у вершині купола при миттєвому вибуху в шахті реактора.

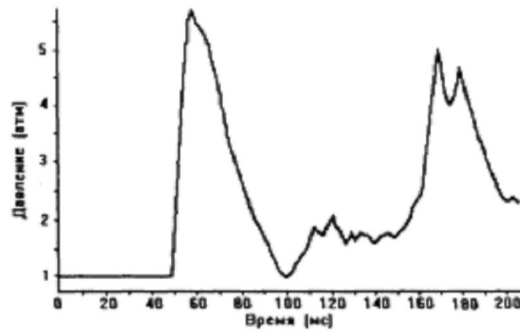


Рис. 4.11

Згідно результатам виконаних розрахунків максимальна інтенсивність напружень в СГО 261.7 МПа, була зареєстрована в момент часу 6.83 мс після проходження пікової інтенсивності тиску на ЗО від вибуху водню 1.407 МПа в циліндричній частині ЗО, розташованій на 36.2 м вище опорної поверхні циліндра. Деформована форма ЗО, яка відповідає вказаному моменту часу, наведена на Рис. 4.12, а ізополі інтенсивності напружень по характерному перерізу ЗО з відповідними цифровими значеннями інтенсивності в тс/м<sup>2</sup> – на Рис. 4.13.

Вказана інтенсивність напружень перевищує межу плинності матеріалу ГСО  $\sigma = 261.7 \text{ МПа} > [\sigma] = 245.0 \text{ МПа}$  на  $(261.7/245.0 - 1) = 6.8\%$ . Але беручи до уваги ефект динамічного зміцнення, який, згідно літературним даним, характеризується підвищенням при швидкоплинних динамічних впливах (великих швидкостях деформацій) межі плинності металу в 1.2-1.3 рази, а межі міцності бетону на 20-40%, можна стверджувати, що в розглянутих аварійних умовах, які супроводжуються дефлаграційним вибухом водню в гермооб'ємі цілісність ГСО не буде порушена (запас несучої здатності ГСО з врахуванням динамічного зміцнення консервативно складе  $(1 - 261.7/(1.2 \cdot 245.0)) = 11.0\%$ ). Таким чином, працездатність ЗО (виконання споруду локалізуючої функції) буде забезпечена.

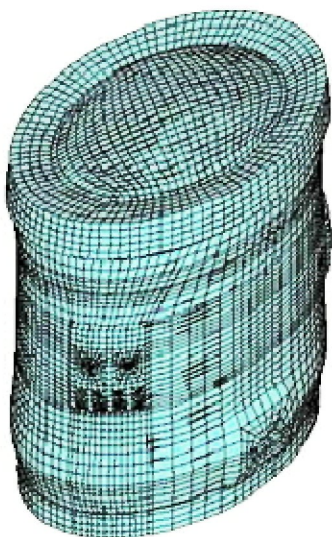


Рис. 4.12

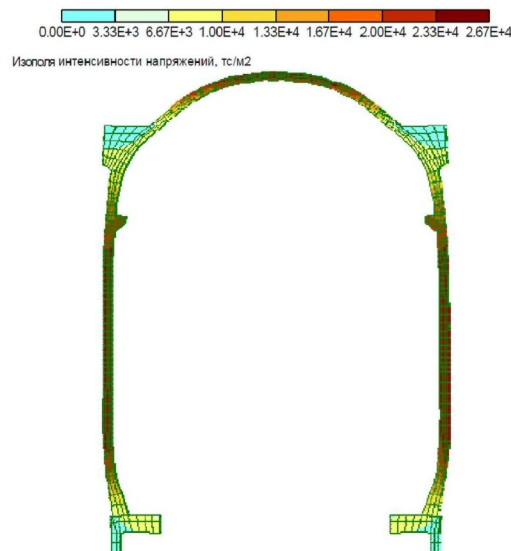


Рис. 4.13

Верифікація розробленої МСЕ-моделі і результатів розрахунків НДС ЗО АЕС. В процесі виконання роботи була виконана верифікація реалізованої за допомогою ПЗ «ДІПРОС» МСЕ-моделі ЗО шляхом зіставлення результатів розрахунку з

результатами, отриманими іншими програмними засобами. Порівняння результатів розрахунку, отриманих з застосуванням ПЗ «ДППРОС» 6.02 мм, і отриманих альтернативними програмними засобами («CONT», «ЛИРА», «SCAD», «ADINA», «ANSYS») – 5.3 ... 7.34 мм показало розбіжність результатів в 13.6 ... 18%. Зазначені розбіжності є цілком прийнятними для великорозмірних об'єктів, моделювання яких зазвичай пов'язане з різноманітними припущеннями і спрощеннями, які інженерний персонал, виходячи з набутого власного розрахункового досвіду, застосовує при виконанні розрахунків.

## **ВИСНОВКИ**

Дисертація Крицького В.Б. є самостійною науковою роботою. До основних наукових результатів, що виносяться на захист, належать наступні:

- виконано постановку задачі аналізу НДС і динамічної поведінки одинарних залізобетонних попередньо напружених циліндричних ЗО з пологим сферичним куполом, на внутрішній поверхні яких влаштовано герметизуюче сталеве облицювання;

- для розрахунку НДС і динамічної поведінки ЗО використано модифікацію методу скінчених елементів (МСЕ) – моментну схему скінчених елементів (МССЕ), а також розроблений автором програмний засіб для ЕОМ «ДППРОС», який реалізує зазначений математичний апарат;

- виконано відповідну ефективну модифікацію чисельних алгоритмів розв'язання рівнянь руху МСЕ-моделі при розрахункових динамічних навантаженнях (стрибок внутрішнього тиску в ЗО в умовах максимальної проектної аварії (МПА) і наступного сейсмічного впливу на ЗО від проектного землетрусу (ПЗ));

- з використанням МСЕ і проблемно-орієнтованого програмного комплексу «ДППРОС» виконано аналіз динамічної поведінки залізобетонної захисної оболонки РВ енергоблоку АЕС при спільній дії стрибка внутрішнього тиску в ЗО в умовах МПА і наступного сейсмічного впливу на ЗО від ПЗ;

- розроблені математичний апарат і програмний комплекс «ДППРОС» дозволили виконати аналіз НДС і динамічної поведінки ЗО при вибуху в РВ енергоблоку АЕС воднево-повітряної суміші в умовах запроектної аварії (ЗПА);

- продемонстровано, що із 100 форм власних коливань ЗО (і відповідним їм частот) нижньої частини повного спектру власних коливань споруди лише 7 форм є «суттєво збуджуваними» (енергетично ємними) – тобто такими, що мають високу модальну масу, і значно впливають на динамічну поведінку об'єкта;

- результатами розрахунків доведено, що в умовах спільної дії аварійного тиску і проектного землетрусу, а також в умовах за проектної аварії з вибухом воднево-повітряної суміші в РВ цілісність сталевого гермооблицювання не буде порушена (запас несучої здатності ГСО становить 20.3% і 11.0%), тобто, працездатність ЗО (виконання спорудою локалізуючої функції) буде забезпечена.

## **СПИСОК ОПРИЛЮДНЕНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

- 1 Крицкий В.Б., Крицкий А.Б., С.А.Мудрагель Численное моделирование

динамического поведения защитной оболочки реакторного отделения АЭС // Прогрессивная техника и технология машиностроения, приборостроения и сварочного производства. - Киев: НТТУ «КПИ», 1998, - С. 165-168.

2 Крицкий В.Б., Карнаухов А.А. Подходы к прогнозированию уровня преднапряжения армоканатов СПЗО и Информационно-экспертная система по накоплению и документированию данных об арматурных канатах СПЗО энергоблоков ВВЭР-1000 АЭС и оценке состояния системы преднапряжения // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, том 2, вып. 2, 1999, -С. 88-99.

3 Крицкий В.Б., Карнаухов А.А., Трубочанинов О.А. Моделирование динамического поведения элементов конструкций АЭС на основе применения смешанного базиса редукции из собственных форм колебаний и векторов Ланцоша // «Ядерная и радиационная безопасность». К.: ГНТЦ ЯРБ, 2000, – № 1. – С. 62-68.

4 Рыжов Д.И., Майборода Е.Е., Крицкий В.Б., Шугайло А.П. Сравнительный анализ нормативных документов по сейсмическому проектированию АЭС, действующих в Украине и России // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, №4, 2002, - С. 47-53

5 Кондратьев С.Н., Крицкий В.Б., Прабхакара М., Рыжов Д.И., Шугайло А.П., Шугайло А-р.П. Оценка эффективности антисейсмических мероприятий в проекте стабилизации объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, №1, 2004, – С. 96-100.

6 Крицкий В.Б., Рыжов Д.И. Оценка применения норм по обеспечению сейсмостойкости для проекта большепролетного арочного сооружения (НБК) над объектом «Укрытие» ЧАЭС // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції». –2005, Т.2. –С 96 – 100.

7 Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Крицкий В.Б., Леткова Н.Г., Шугайло Ар.П., Шугайло А.П. Анализ современного состояния нормативной базы Украины по обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций и оборудования ядерных установок // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць „Будівельні конструкції” Випуск № 64, 2006, - С. 140-146.

8 Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Шугайло А-р.П., Шугайло А.П. Проблемные вопросы в нормативной базе Украины по обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций, систем и элементов ядерных установок // Ядерна та радіаційна безпека. – 2006, Т. 9, вип. 2. – С. 34-40.

9 Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Крицкий В.Б., Леткова Н.Г., Шугайло Ар.П., Шугайло А.П. О необходимости проведения исследований сейсмической опасности площадок АЭС Украины с использованием современных международных требований и подходов // Зб. наук. праць СНУЯЕтаП. – 2007, № 3, (23) – С. 155-164.

10 Шугайло А-й П., Шугайло А-р П., Рыжов Д. И., Крицкий В. Б., Романов С. В., Колупаев А. М Рекомендации по совершенствованию национальной нормативной базы в части продления срока эксплуатации и управления старением энергоблоков АЭС Украины // Ядерна та радіаційна безпека. – 2013, Т. 59, вип. 3. – С. 3-9.

11 Крицкий В.Б., Марьенков Н.Г., Бабик КН., Недзведская О.Г. Нелинейная

сейсмическая реакция защитной оболочки энергоблока АЭС после проектной аварии // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць «Будівельні конструкції». – 2015, – № 82. - С. 619-636.

12 Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Улановский М.Г. О результатах сопоставительных расчетов защитной оболочки реакторного отделения ВВЭР-1000/В-320 // The Analysis of Pre-stress Loss in Tendons of the WWER-1000 Containments. International Conference Proceedings. GRS, Berlin, Germany, 12-19.12.1998. – Berlin, Germany: GRS, 1999. –P. 141 – 158.

13 Krytskyy V.B. About Use in Ukraine the FEM Assessments and Grounds of the Strength and Reliability of the Nuclear Installation's Structures // The Finite Element Analysis of Degraded Concrete Structures. OECD/NEA Workshop Proceedings. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA, 29-30.10.1998. – Paris, France: OECD, 1999.- P. 88 – 92.

14 Krytskyy V.B. Karnauhov A.A., Ulanovsky M.G. Service Life Predication and Ageing Management of WWER-1000 NPP's Concrete Containment Pre-stress System // Life Predication and Ageing Management of Concrete Structures. International Conference Proceedings. Bratislava, Slovakia, 06-08.07.1999. – Bratislava, Slovakia: Expertcentrum, 1999.-P. 203 – 206.

15 Krytskyy V.B. Analysis of Shelter (Sarcophagus) Structures Possibility Collapse under Seismic Input and Probabilistic Assessments of Following Severe Accident Occur // Seismic Risk. OECD/NEA Workshop Proceedings. Tokyo, Japan, 10-12.08.1999. – Paris, France: OECD, 1999. P. 115 - 128

16 Krytskyy V.B. The Normative Requirements, Design Bases, Researches and Assessments in the Field of Ukrainian NPP's Seismic Safety // Review Procedures for Seismic Re-Evaluation of Equipment and Components. IAEA International Workshop Proceedings. Vienna, Austria, 05-07.06.2000. – Vienna, Austria: IAEA, 2000. P. 63 – 69.

17 Krytskyy V.B. Siting and Loading Aspects in Structural Safety Analysis of Ukrainian NPPs in Relation to Extreme External Events // Structural Safety of NPPs in Relation to Extreme Loads. IAEA International Workshop Proceedings. Vienna, Austria, 04-08.12.2000. – Vienna, Austria: IAEA, 2001. P. 83 – 92.

18 В.Б.Крицкий. Применение смешанного базиса редукции на основе векторов Ланцоша и собственных форм для экспресс-анализа работоспособности защитных оболочек АЭС // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Математичні проблеми технічної механіки – 2007». – Дніпродзержинськ, 2007. – с. 130.

## АНОТАЦІЯ

**Крицький В.Б. Чисельне моделювання динаміки захисних оболонок атомних електростанцій при короткочасних навантаженнях.-Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, 2016.

Дисертація посвячена застосуванню методу скінчених елементів і програмного засобу «ДИПРОС» для аналізу динамічної поведінки залізобетонної захисної оболонки (ЗО) енергоблоку АЕС при спільній дії стрибка внутрішнього тиску,

обумовленого аварією в реакторному відділенні, і сейсмічного впливу від проектного землетрусу. На основі модального аналізу і подальшого чисельного рішення рівнянь руху ЗО визначено напружено-деформованого стану конструкцій споруди в післяаварійний період. Показано, що максимальна інтенсивність напружень в герметизуючому сталевому облицюванні (ГСО) ЗО не перевищує межу пластичності матеріалу ГСО. Тобто зберігається цілісність ГСО, ЗО залишається працездатною й забезпечує дотримання вимог з радіаційної безпеки.

**Ключові слова:** енергоблок АЭС, захисна оболонка, реакторне відділення, залізобетон, герметизуюче сталеве облицювання, аварійний тиск, динамічна поведінка, проектний землетрус, ядерна та радіаційна безпека, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів.

### АННОТАЦИЯ

**Крицкий В.Б. Численное моделирование динамики защитных оболочек атомных электростанций при кратковременных нагрузках. – Рукопись**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. – Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена применению метода конечных элементов и программного средства «ДИПРОС» для анализа динамического поведения железобетонной защитной оболочки (ЗО) энергоблока АЭС при совместном действии скачка внутреннего давления, обусловленного аварией в реакторном отделении, и сейсмического воздействия от проектного землетрясения. На основе модального анализа и дальнейшего численного решения уравнений движения ЗО определено напряженно-деформированное состояние конструкций сооружения в послеаварийный период. Показано, что максимальная интенсивность напряжений в герметизирующей стальной облицовке (ГСО) ЗО не превышают границу текучести материала ГСО. То есть сохраняется целостность ГСО, ЗО остается работоспособной и обеспечивает выполнение требований радиационной безопасности.

**Ключевые слова:** энергоблок АЭС, защитная оболочка, реакторное отделение, железобетон, герметизирующая стальная облицовка, аварийное давление, динамическое поведение, проектное землетрясение, ядерная и радиационная безопасность, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

### ABSTRACT

**Krytskyi V.B. Numerical simulation of the dynamics of containments of nuclear power plants at short-term loads. - Manuscript**

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 01.02.04 - mechanics of deformable solids. - Institute of Mechanics. SP Tymoshenko National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

Dissertation is devoted to further development of finite element method and software "DIPROS" by which performed the analysis of the dynamic behavior of a reinforced concrete containment (CC) of NPP unit under the combined action of the internal pressure of the shock caused by the accident in the reactor hall, and seismic influence on the design

basis earthquake. Based on the modal analysis and further the numerical solution of equations of motion CC defined stress-strain state of structures in the construction of the post-accident period. It is shown that the maximum intensity of the stresses in the sealing of steel cladding liner (SCL) CC does not exceed the limit yield SCL material. That is, preserved the integrity of the SCL, CC remains operational and ensures the implementation of radiation safety requirements.

**Key words:** NPP, NPP unit, containment, reactor hall, concrete, liner, tendon, pre-stress system, design accident pressure, dynamic behavior, design earthquake, nuclear and radiation safety, stress-strain state, finite element method.