

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**

**на дисертаційну роботу Крицького Володимира Борисовича**  
**«ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЗАХИСНИХ ОБОЛОНОК**  
**АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ**  
**НАВАНТАЖЕННЯХ»,**

**поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**  
**за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла**

**Актуальність теми.** В Україні при експлуатації і побудові атомних електростанцій (АЕС) часто використовуються одинарні залізобетонні попередньо напружені підкріплені циліндричні захисні оболонки (ЗО) з внутрішнім сталевим герметизуючим облицюванням (СГО). ЗО реакторного відділення (РВ) енергоблоку АЕС являється складовою системи глибоко ешелонованого захисту реакторної установки, ізолює її від впливу зовнішнього середовища і забезпечує локалізацію радіоактивних речовин в підоболонковому просторі при дії зовнішніх аварійних чинників і потенційно можливих аваріях у РВ. ЗО являються основним елементом захисту довкілля від радіаційних викидів. Для розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) і динаміки ЗО можна використовувати відомі теорії дискретно підкріплених шаруватих оболонок і теорію оболонок на пружній основі. Але розроблені в цих літературних джерелах методи не зовсім зручні для розрахунків ЗО, які представляють собою складні оболонкові великогабаритні конструкції. Тому для розрахунку НДС і динаміки ЗО доцільно створювати нові і розвивати існуючі методи скінчених елементів (МСЕ) і на їх базі розробити пакети прикладних програм для комп'ютерної реалізації. Це дасть можливість розв'язати актуальні задачі міцності і динамічної поведінки ЗО при можливих техногенних аваріях.

Дисертаційна робота виконана у відповідності до програм і планів наукових робіт Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України за науковими темами, зокрема: “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.).

**Метою роботи** є дослідження напружено деформованого стану (НДС) і коливань ЗО при нестационарних навантаженнях та аналіз поведінки ЗО в

умовах потенційно можливої максимальної проектної або запроектної аварії, включаючи:

- вибір і обґрунтування теоретичних моделей досліджуваних ЗО;
- розробку методів розрахунку полів напружень в ЗО під дією власної ваги і динамічних навантажень;
- розробку критеріїв міцності елементів ЗО, в яких одночасно враховується дія власної ваги і динамічних навантажень;
- проведення теоретичних досліджень поведінки ЗО в умовах потенційно можливої максимальної проектної або запроектної аварії

**Наукова новизна** полягає в даній уточненій постановці задач по динамічній поведінці ЗО при дії короткочасних аварійних навантажень;

- розробленні програмного комплексу Динаміка і міцність оболонкових систем «ДІМОС» для розрахунку НДС і динамічної поведінки ЗО, де використано модифікацію методу скінчених елементів (МСЕ) – моментну схему скінчених елементів (МСКЕ)
- модифікації 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)), в якому реалізовано вищезгаданий математичний апарат для моделювання НДС і динамічної поведінки тонкостінних конструкцій з врахуванням уточненого граничного стану узагальненого коефіцієнта тертя між армоканатами (АК) і каналоутворювачами;
- створенні математичного апарату для моделювання НДС і динамічної поведінки тонкостінних конструкцій шляхом застосування комбінованих (змішаних) редуційованих МСЕ-моделей, утворених використанням притаманних вихідній МСЕ-моделі форм власних коливань і векторів Ланцоша;
- розробленні і програмній реалізації структурно наближених до реальної споруди (порівняно з попередніми відомими проектними і дослідницькими розробками) розрахункової моделі залізобетонної оболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС для вивчення НДС і коливань ЗО при короткочасних динамічних впливах, спричинених аварійними процесами в РВ і зовнішніми екстремальними подіями;
- вперше реалізовано метод прямого динамічного аналізу НДС і коливань тонкостінних конструкцій для редуційованої МСЕ-моделі великорозмірної відповідальної споруди (ЗО) для спільної дії аварійних технологічних (тиск, вибух киснево-водневої суміші у РВ) 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 результатів розрахунків** НДС і динамічної поведінки ЗО забезпечується:

точним і детальним моделюванням геометрії і внутрішньої структури конструкцій ЗО, коректним (реалістичним) врахуванням фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів;

теоретичним обґрунтуванням збігу застосованої схеми МСЕ;

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

обґрунтуванням оптимальності застосованої МСЕ-мережі обчислювальними експериментами;

перевіркою практичної збіжності обчислювального процесу здійсненням серії контрольних розрахунків;

верифікацією розробленої методики порівнянням з аналітичними рішенням тестових задач, з результатами альтернативних розрахунків (іншими програмними засобами) і натурних спостережень.

**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 різних проектів ЗО і визначення їх потенціальної працездатності.

Практичне значення отриманих у роботі результатів полягає в тому, що розв'язання нових практичних задач динаміки ЗО складної геометрії з напівсферичним куполом, технологічними отворами і попередньо напруженими залізобетонними шарами при нестационарних навантаженнях, а також розроблені методи (методика), скінчено елементні алгоритми та програми розрахункового розв'язку задач, одержані в роботі, можуть бути використані для дослідження прикладних задач в науково-дослідних та конструкторських організаціях при проектуванні великогабаритних оболонкових конструкцій, що дасть можливість значно зменшити вірогідність виникнення руйнувань і підвищити термін експлуатації ЗО АЕС, що підтверджується актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Автором визначені мета і завдання досліджень, сформульовані наукові положення дисертації: розв'язані задачі про НДС і коливання ЗО при короткочасних аварійних навантаженнях. З допомогою розробленого і вдосконаленого автором програмного комплексу «ДІМОС», проведено чисельне моделювання конструкцій ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях, розв'язані задачі по забезпеченні сейсмостійкості АЕС, реалізована ідея теоретичного дослідження взаємодії ударних хвиль при вибуху

киснево - водної суміші у РВ. Автор навів 5 самостійних робіт, в інших роботах співавторам в основному належать обговорення і аналіз сумісних результатів.

**За результатами дисертації опубліковано 18 робіт, зокрема, 6 статей у науко метричних фахових виданнях, 5 статей у фахових журналах і збірниках України, 7 робіт у збірниках матеріалів і праць міжнародних і наукової конференцій. Наведені роботи в достатній мірі висвітлюють зміст дисертації.**

**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.

Дисертація і автореферат написані на високому науковому рівні, а автореферат досить повно висвітлює зміст дисертації. Робота відповідає вимогам щодо кандидатських дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. В дисертації розв'язана важлива науково – технічна задача: чисельне моделювання динаміки ЗО АЕС при короткочасних навантаженнях.

Дисертаційна робота пройшла апробацію. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких міжнародних наукових конференціях: The Analysis of Pre-stress Loss in Tendons of the WWER1000 Containments. International Conference Proceedings. GRS, Berlin, Germany, 12-19.12.1998. – Berlin, Germany: GRS, 1999. 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. International Conference Proceedings. Bratislava, Slovakia, 06-08.07.1999. – Bratislava, Slovakia: Expertcentrum, 1999. Seismic Risk. OECD/NEA Workshop Proceedings. Tokyo, Japan, 10-12.08.1999. – Paris, France: OECD, 1999. IAEA International Workshop Proceedings. Vienna, Austria, 05-07.06.2000. – Vienna, Austria: IAEA, 2000. Structural Safety of NPPs in Relation to Extreme Loads. IAEA International Workshop Proceedings. Vienna, Austria, 04-08.12.2000. – Vienna, Austria: IAEA, 2001, В.Б.Крицкий. Применение смешанного базиса редукции на основе векторов Ланцоша и собственных форм для экспресс-анализа работоспособности защитных оболочек АЭС/ В.Б.Крицкий // Математичні проблеми технічної механіки – 2007. Міжнародна наукова конференція. Матеріали конференції. – Дніпродзержинськ, 2007. – С. 130.

Окремі положення дисертації періодично доповідались на наукових семінарах відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України (Київ, 2013–2016). Дисертація у завершеному вигляді доповідалася і обговорювалася на науковому семінарі відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України і семінарі за напрямком Механіка оболонкових систем (Київ, 2016).

**Зауваження по роботі.**

1 В дисертації не вказано, яким чином в розрахунках НДС і динамічної поведінки ЗО враховувався вплив температури пароповітряного середовища в гермооб'ємі, а також вплив температури зовнішнього повітря.

2 Не проаналізований аспект можливої втрати стійкості панелями сталюого гермооблицювання, які перебувають в стані двовимірного стискання.

3 Не вказано, яким чином в розрахунках НДС і динамічної поведінки ЗО враховувалось розтріскування бетону внаслідок напружень розтягу в матеріалі ЗО.

4 Не відмічено, як враховувалось складне НДС сталюого гермооблицювання в зонах наявності концентраторів напружень.

5 Не показано, яка саме вторинна дія від вибуху повітряно-водневої суміші в гермооб'ємі враховувалася в розрахунках – відбита ударна хвиля в газовому середовищі або пружна хвиля в конструкції ЗО.

Зроблені зауваження не впливають на загальний висновок по дисертації.

**Загальний висновок.** Тематика і одержані результати роботи відповідають спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла і профілю спеціалізованої вченої ради. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.11 «Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» постанови Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567, а її автор Володимир Борисович Крицький заслуговує присудження йому вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри теоретичної механіки  
Київського національного університету  
будівництва і архітектури

В.В. Гайдайчук

Підпис засвідчую:

Вчений секретар Київського  
національного університету  
будівництва і архітектури,  
кандидат технічних наук, доцент



О.С. Петренко