

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Іщенко Олексія Антоновича

на тему «Напружено-деформований стан тонкостінних оболонок реактора

ВВЕР-1000 при максимальній проєктній аварії»

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 – Механічна інженерія

за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

На сьогоднішній день теплофізичні процеси, які відбуваються в реакторах АЕС під час важких аварій, є недостатньо вивченими, так як динаміка та особливості їх перебігу є дуже непередбачуваними. Тому для оцінки несучої здатності конструктивних елементів реактора під час можливих аварій постає необхідність у фундаментальних дослідженнях супутніх фізико-механічних та тепло-гідравлічних процесів. Однією з найнебезпечніших аварій для внутрішньокорпусних пристроїв реактора є «максимальна проєктна аварія» (МПА), яка полягає у двосторонньому гільйотинному розриві головного циркуляційного трубопроводу з безперервним витіканням теплоносія при роботі реактора на номінальній потужності, внаслідок чого відбувається швидке охолодження опускної ділянки реактора та миттєве падіння тиску, що супроводжується потужним гідроударом. Першим внутрішньокорпусним пристроєм, що сприймає гідроудар, є шахта внутрішньокорпусна (ШВК), яка через невелику товщину може бути розірвана або сильно zdeформована в зоні, яка знаходиться навпроти розірваного патрубку. Тому розробка ефективних аналітично-чисельних методів описання динамічної поведінки та напружено-деформованого стану ШВК реактору ВВЕР-1000 під час МПА є актуальною науково-практичною задачею сучасної механіки деформівного твердого тіла, вирішення якої дозволить запобігти або мінімізувати наслідки можливих аварій на діючих в Україні ядерних енергоблоках АЕС.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

За результатами вирішення поставлених завдань досліджень сформульовано та відповідним чином обґрунтовано декілька важливих наукових положень, винесених на захист, які мають ознаки наукової новизни. Зокрема, здобувачем було модифіковано алгоритм Вільямса-Віттріка і пристосовано його для точного визначення власних частот коливань циліндричних та конічних оболонок з урахуванням наявності в них початкових

напружень, зумовлених дією внутрішнього або зовнішнього тиску та розтягувальної або стискаючої осьової сили.

Достовірність отриманих наукових результатів підтверджується високою збіжністю величин власних частот коливань шарнірно-опертої конічної оболонки, отриманих із застосуванням розробленого алгоритму, з експериментальними даними, взятими з авторитетних літературних джерел.

Розроблені імітаційні моделі та аналітичні методи відповідають сучасному рівню динамічного аналізу та розрахунків напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонок. А положення наукової новизни та висновки, сформульовані в представленій роботі, відповідають вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Таким чином, наукове завдання, поставлене в дисертаційній роботі, можна вважати виконаним повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Іщенка О.А. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 – Прикладна механіка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Прикладна механіка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Атомна енергетика».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Іщенка Олексія Антоновича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою в цілому зрозуміло, а послідовність викладення результатів досліджень і велика кількість оригінального ілюстративного матеріалу дає можливість однозначно зрозуміти їх зміст. Проте в частині викладення матеріалу є деякі недоліки, серед яких слід відмітити наступні:

- на стор. 61 посилання в тексті на формули (2.7)-(2.9) не відповідають змісту цих формул;

- на стор. 74 вжито термін «зміна кривизни в крученні», хоча зміна кривизни має відбуватися в деякій площині або за якимось напрямком;

– на стор. 112 та 114 вживаються словосполучення «неявного Ейлера» та «зворотного Ейлера» відповідно. Більш зрозумілим було б використання словосполучення «неявна схема алгоритму Ейлера»;

– на стор. 134 вказано, що «Механічні характеристики матеріалу 08X18H10T оболонки ШВК визначені модулем пружності $E = 207$ ГПа, густиною $\rho = 7833$ кг/м³ та коефіцієнтом Пуассона $\mu = 0,3$ ». Однак густина не відноситься до механічних характеристик, тому доречніше було б прибрати слово «механічні»;

– у розшифровці формул (4.8) та (4.9) на стор. 144 відсутні формули для визначення σ_2 , ..., σ_6 . Крім того, символи Q та t , які входять в ці формули, були використані в попередніх розділах роботи для позначення поперечної сили та часу відповідно. Очевидно, що в цих формулах вони мають інший сенс;

– на стор. 150 вказано, що посилальне напруження S_r характеризує наближення до крихкого руйнування, хоча очевидно, що воно характеризує наближення до в'язкого руйнування, оскільки наближення до крихкого руйнування характеризується КІН.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань та додатку. Загальний обсяг дисертації 177 сторінок, в тому числі 75 рисунків, 13 таблиць, 1 додаток і перелік посилань із 207 бібліографічних найменувань на 20 сторінках.

У **вступі** здобувачем обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, відзначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про структуру та обсяг роботи, її апробацію, зазначено особистий внесок автора.

У **першому розділі** приведена детальна класифікація аварій, можливих в процесі експлуатації ядерних реакторів АЕС. Особливо відзначена група аварій, які несуть найбільшу небезпеку для внутрішньокорпусних пристроїв реактора, зокрема і максимальна проєктна аварія (МПА). Описано динаміку нестационарних тепло-гідравлічних процесів, які відбуваються протягом перших хвилин протікання МПА.

Проведено аналіз наукових публікацій та програмних документів декількох країн щодо тепло-гідравлічних моделей внутрішньокорпусних пристроїв реактора та термосилових навантажень, які діють на них під час перебігу аварій типу МПА. В результаті встановлено, що суттєвою проблемою при використанні сучасних кодів для проведення тепло-гідравлічних розрахунків є застосування наближених розв'язків рівнянь Нав'є-Стокса, які потребують адекватного вибору моделі турбулентності, а знаходження точного розв'язку таких рівнянь у тривимірній нестационарній постановці потребує декількох років машинного часу, навіть за умов використання найбільш сучасних і потужних ЕОМ. Крім того, зазначено, що більш прості імітаційні

моделі, які можуть бути створені за допомогою комерційних пакетів комп'ютерних програм типу ANSYS або SOLIDWORKS, навіть на теперішньому етапі розвитку інформаційних технологій потребують ретельної валідації вихідних даних та верифікації розрахункової схеми.

У **другому розділі** побудована математична модель для дослідження коливань тонкостінної оболонки у відповідності до теорії Доннела-Муштарі. Запропоновано умовне розбиття оболонки на невеликі ділянки вздовж твірної для зменшення ступеню поліномів, які є розв'язками вихідної системи диференціальних рівнянь рівноваги при використанні методу початкових параметрів. В результаті встановлено, що при використанні квадратичних або кубічних поліномів збіжність розв'язку забезпечується при розбитті оболонки на 100 і більше рівних частин.

Також здобувачем було удосконалено алгоритм Вільямса-Віттріка таким чином, що його застосування стало можливим для визначення власних частот коливань циліндричних та конічних оболонок з кінематичними та жорсткістними граничними умовами, зокрема для випадку наявності в них початкових напружень. Результати розрахунків за розробленим алгоритмом для конічних оболонок з різними комбінаціями граничних умов показали добру збіжність з експериментальними даними при низьких частотах коливань.

У **третьому розділі** запропоновано оригінальний підхід до оцінки навантажень, викликаних рухом ударної хвилі декомпресії, за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки. Розроблено репрезентативну модель реактора ВВЕР-1000, яка відтворює локальні особливості руху теплоносія, описаного у двофазній постановці з урахуванням кипіння. Для замикання обміну між фазами при ударній декомпресії на основі тесту Едвардса розроблено спрощену математичну модель динаміки фазового переходу. В рамках запропонованої моделі кількість осередків утворення бульбашок пари опосередковано встановлюється об'ємною часткою неконденсованого газу і середнім діаметром бульбашки. Шляхом прямих чисельних розрахунків на сітках різної щільності встановлено ступінь дискретизації розробленої моделі, необхідної і достатньої для адекватного відображення гідравлічних характеристик активної зони реактора та температурних показників в елементах із внутрішніми джерелами тепла.

Також автором запропонована методика визначення переміщень у циліндричних оболонках при динамічному навантаженні, яка полягає у розв'язуванні диференціальних рівнянь методом нормальних координат із застосуванням інтегралу Дюгамеля.

У **четвертому розділі** шляхом порівняння динамічних характеристик деталізованої та спрощеної (прийнятої в роботі) моделей циліндричної оболонки ШВК реактора ВВЕР-1000 проведена валідація геометричної форми

та розрахункової схеми останньої. При розрахунках відповідних характеристик наближеної моделі використовувалась система MATLAB, а при розрахунках точної моделі – програмний код ANSYS. В результаті було встановлено, що наближена модель дає достатньо точні для інженерних розрахунків значення чотирьох перших власних частот коливань. Проведені розрахунки напружено-деформованого стану спрощеної моделі ШВК протягом першої секунди протікання МПА. В результаті встановлено місце знаходження перерізу, в якому внаслідок гідроудару виникає максимальне переміщення в радіальному напрямку, та величину цього переміщення. Також розраховані величини максимальних мембранних та згинальних напружень, які виникають протягом першої секунди перебігу МПА, з точністю до тисячної долі секунди встановлено час їх виникнення у верхній (неопромінений) та нижній (опромінений) частинах ШВК.

Крім того, на основі проведених розрахунків напружень, використовуючи двокритеріальний підхід стосовно допустимих характеристик пластичності та тріщиностійкості оцінена конструкційна міцність ШВК. В результаті встановлено, що найбільш небезпечною є окружна тріщини у нижній частині ШВК, значення коефіцієнту інтенсивності напружень для якої досягають 90 % від допустимого значення.

Загальні висновки по роботі в повній мірі відповідають поставленій меті та задачам дослідження.

Перелік посилань містить достатню кількість сучасних джерел, які підтверджують актуальність теми роботи. Крім того, щодо кожного з аспектів роботи, зокрема методів модального аналізу тонкостінних оболонок, тепло-гідравлічних моделей потоку частково киплячої рідини в ядерних реакторах та критеріїв міцності циліндричних оболонок з постульованими тріщинами, проведений вичерпний аналіз вітчизняних та закордонних літературних джерел та програмних документів багатьох держав, що свідчить відповідність використаних методів, моделей та критеріїв сучасному рівню наукових досліджень в розглянутих галузях. Серед недоліків переліку посилань слід відмітити наступний:

– на стор. 53 зроблені деякі важливі висновки на основі теореми Абеля-Руффіні, однак посилання на літературне джерело, в якому можна було б ознайомитися з даною теоремою, відсутнє.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 18 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату

опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus. Результати дисертації апробовані на 14 наукових фахових конференціях.

Таким чином, кількість наукових статей та рівень видань, в яких вони опубліковані, цілком відповідають вимогам щодо публікацій для оприлюднення результатів дисертаційної роботи. А велика кількість результатів апробації роботи свідчать про високий інтерес вітчизняної та міжнародної наукової спільноти до проведених в її рамках досліджень.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Відзначаючи високий рівень виконання роботи та науково-практичне значення отриманих результатів, до тексту дисертації можна зробити деякі зауваження та поставити декілька запитань, серед яких слід відмітити наступні.

- на рис. 2.1 та 2.2, приведених на стор. 57, зображено елемент конічної оболонки, при цьому у відповідних підписах до них вказано, що оболонка циліндрична;

- у підписі до блоку формул (2.5)-(2.10) на стор. 59 вказано, що «... χ_x , χ_φ та $\chi_{x\varphi}$ – кривини...», однак є обґрунтовані підстави вважати, що мова йде про відносні зміни початкових кривин. Це ж саме стосується і блоку формул (2.16)-(2.18) на стор. 60;

- рис. 2.6 на стор. 66 підписаний як «залежність кількості ділянок оболонки від частотного параметра...», однак варіювати ми можемо саме кількість ділянок, а змінюватись при цьому буде частотний параметр в залежності від цієї кількості;

- при дослідженні впливу початкових напружень на частотні параметри на стор. 75–76 було постульовано стискаючу силу величиною 86942 Н. Незрозуміло, чим обумовлений вибір саме такої величини;

- у рівнянні (3.30) на стор. 128 замість ω_i слід писати ω_i^2 . Крім того, бажано було б привести формулу

$$\omega_i = \sqrt{\frac{r}{m}};$$

- з тексту дисертації незрозуміла суть параметра тріщиностійкості матеріалу $J_{0,2}$, приведенного в табл. 4.2 на стор. 144, та його можливий зв'язок з напруженням $\sigma_{0,2}^D$;

- у розшифровці до формули (4.13) на стор. 148 вказано, що σ_{ys} – границя міцності з посиланням на [198], однак у документі API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service на стор. 2-16 вказано, що σ_{ys} – Material Yield Stress, тобто границя текучості матеріалу;

– у розшифровці до формули (4.21) вказано, що P_{LL} – граничне значення узагальненого навантаження в'язкого руйнування для ідеально пластичного тіла з граничною характеристикою, яка дорівнює границі міцності. При цьому загально відомим є те, що діаграма деформування ідеально пластичного матеріалу не має границі міцності і обмежена зверху площадкою текучості.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Іщенка Олексія Антоновича на тему «Напружено-деформований стан тонкостінних оболонок реактора ВВЕР-1000 при максимальній проєктній аварії» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в пп. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Іщенко Олексій Антонович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Рецензент:

старший науковий співробітник
відділу міцності зварних конструкцій
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України
кандидат технічних наук, старший дослідник



Андрій МОЛТАСОВ

Підпис к.т.н., с.д. Молтасова А.В. засвідчую.

Вчений секретар
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України
кандидат технічних наук, старший дослідник



Ілля КЛОЧКОВ