ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Іщенка Олексія Антоновича

на тему "Напружено-деформований стан тонкостінних оболонок реактора ВВЕР-1000 при максимальній проєктній аварії"

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

у галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

Забезпечення цілісності корпусу реактора та його внутрішньокорпусних пристроїв для всіх можливих режимів, у тому числі аварійних ситуацій, є одним із найбільш важливих задач сучасної прикладної науки та основною умовою безпечної експлуатації енергоблоків АЕС, а також подовження їх ресурсу. Для вирішення цих задач виникає необхідність розвитку і застосування сучасних методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкцій реакторної установки із оптимальним, з точки зору можливостей сучасної обчислювальної техніки, урахуванням сумісного впливу такого комплексу факторів як: неоднорідність термосилового навантаження, деградація механічних властивостей матеріалів, процеси повзучості та релаксації напружень, вплив залишкових технологічних напружень та зміна характеристик тріщиностійкості.

Аналіз надійності внутрішньокорпусних пристроїв реактора за умов максимальної проєктної аварії є обов'язковим при оцінці його технічного стану. Під максимальною проєктною аварією для реактора типу ВВЕР розуміється розгерметизація першого контуру внаслідок миттєвого розриву трубопроводу. Для обґрунтування безпечної експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв виникає необхідність оцінки можливих аварійних ситуацій з утворенням термогідроудару. Це передбачає оцінку можливих зіткнень оболонки шахти з іншими внутрішньокорпусними пристроями та оцінку можливого її руйнування. Отже, актуальним завданням є визначення динамічної реакції оболонки внутрішньокорпусної шахти у початкові моменти часу максимальної проєктної аварії. Для вирішення цієї задачі визначальним є отримання достовірних вихідних даних розподілу тиску за результатами моделювання умов теплообміну з урахуванням змішування робочих рідин та результатів теплогідравлічних випробувань із застосуванням програмних кодів, наприклад, RELAP5.

Таким чином, актуальною і важливою науково-практичною задачею є розроблення моделей і методів чисельного аналізу зв’язаних нестаціонарних теплогідравлічних процесів та коливань внутрішньокорпусної шахти реактора

типу ВВЕР під час максимальної проєктної аварії. Ця задача вимагає розвитку методів обчислювальної гідродинаміки та розробки ефективних, з точки зору витрат обчислювальних ресурсів, моделей тонкостінних конструктивних елементів реактора при дії імпульсних просторових навантажень, а також оцінки ймовірності їх крихкого та в'язкого руйнування.

Отже, задача, що вирішується у представленій дисертації є актуальною і має важливе практичне значення, зумовлене необхідністю обґрунтування безпечної експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 для понадпроєктного терміну експлуатації у разі гіпотетичного аварійного сценарію з розривом головного циркуляційного трубопроводу. Актуальність тематики проведених у дисертаційній роботі досліджень також підтверджується тим, що вона виконувалась у рамках гранту Європейського Союзу ENEN2plus (ORIZON-EURATOM-2021-NRT-01-13101061677; ID гранту: 0000000695). Результати дисертаційної роботи Іщенка О.А. були використанні ВП «Південноукраїнської АЕС» при оцінці технічного стану і продовження ресурсу внутрішньокорпусних пристроїв реактора енергоблоку № 3, про що свідчить акт впровадження.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у розробленні нових моделей для аналізу динамічного напружено-деформованого стану оболонки внутрішньокорпусної шахти реактора ВВЕР-1000 з урахування нестаціонарних теплогідродинамічних навантажень під час максимальної проєктної аварії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у вдосконаленні алгоритму розрахунку аварійного режиму роботи реактору нестаціонарних температурних полів та гідродинамічних показників. За результатом чисельних розрахунків методами обчислювальної гідродинаміки встановлено розподіл тису теплоносія на внутрішній та зовнішній поверхнях внутрішньокорпусної шахти реактора у початкові моменти часу максимальної проєкної аварії. Дані щодо просторово-часового розподілу було застосовано для розрахунку реакції оболонки на дію імпульсного навантаження при розгерметизації. Реакцію системи отримано методом головних координат для чого у роботі побудовано аналітичні моделі оболонок та розвинуто методи визначення їх модальних характеристик для різних граничних умов та початкових напружень.

Достовірність отриманих результатів роботи забезпечується використанням відомих методів досліджень та верифікацією отриманих

результатів тестових розрахунків із відомими з літератури експериментальними даними та порівнянням результатів, одержаних за допомогою тривимірних скінченноелементних моделей оболонки внутрішньокорпусної шахти реактора.

Наукові дослідження проведено на кафедрі динаміки і міцності машин та опору матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського і у відділі розрахунків на міцність ТОВ «ІПП-Центр».

Отже, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання з розроблення моделей та методів чисельного аналізу теплогідродинамічних навантажень та динамічного напруженого стану внутрішньокорпусної шахти реактора за умови максимальної проєктної аварії виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача О.А. Іщенка 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. Всі результати досліджень викладені у логічній послідовності, форма викладення доступна для фахівців, термінологія загалом відповідає загальноприйнятій у галузі знань "Механічна інженерія".

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатку. Загальний обсяг дисертації 177 сторінки, у тому числі список літератури із 207 найменувань на 19 сторінках, 75 рисунків та 13 таблиць.

У ***вступі*** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, його предмет та об’єкт; зазначено наукову новизну

отриманих результатів та їх практичне значення; наведено інформацію щодо апробації результатів дисертаційної роботи та відмічено особистий внесок здобувача.

У ***першому*** розділі приведено загальну класифікацію аварійних режимів під час експлуатації енергоблоків АЕС. Розглянуто основні типи проєктних аварій водо-водяних реакторів. Показано, що однією із найнебезпечніших типів аварій для внутрішньокорпусних пристроїв реактора є максимальна проєктна аварія, яка являє собою двосторонній "гільйотинний" розрив головного циркуляційного трубопроводу із безперервним витіканням теплоносія. Першим внутрішньокорпусним пристроєм, який отримує гідроудар внаслідок розриву патрубка є внутрішньокорпусна шахта, що і обумовило напрям подальших досліджень з визначення гідродинамічних навантажень та динамічної реакції оболонки шахти. За результатом огляду літературних джерел обґрунтовано використання методів обчислювальної гідродинаміки для опису гідроудару на внутрішньокорпусну шахту реактора ВВЕР-1000. За результатом проведеного огляду літератури, зокрема спрощених моделей оболонок для аналізу їх коливань, сформульовано задачі досліджень.

У ***другому*** розділі представлено аналітичну модель конічної та циліндричної оболонок для аналізу їх вільних та вимушених коливань, що отримана на основі варіанту методу початкових параметрів для різних граничних умов для сил та зміщень з урахуванням початкових напружень.

Компоненти матриці динамічної жорсткості системи, що розглядаються за певних граничних умов, є трансцендентними функціями частоти коливань. У такому разі лінійна задача визначення власних частот не може бути сформульована. У такому разі для визначення власних значень матриці динамічної жорсткості застосовуються різні методи, зокрема ітераційні. Так у даній роботі, для вирішення цієї задачі застосовано алгоритм Віттрика-Вільямса, який розроблено для стрижневих елементів конструкцій, а у даній роботі розвинуто для оболонок.

Для розроблених аналітичних моделей оболонок проведено дослідження впливу кількості ділянок та ступеню локальної поліноміальної апроксимації переміщень та сил на збіжність значень власних частот коливань. Достовірність розроблених моделей циліндричних оболонок додатково було підтверджено шляхом порівняння результатів визначення власних частот коливань з відомими експериментальними даними.

У ***третьому*** розділі розглядається оригінальний підхід до оцінки ударних навантажень за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки, який виявився ефективним для прогнозування руху ударної хвилі декомпресії у

початкові моменти часу максимальної проєктної аварії. Для підтвердження ефективності методу у розділі приведено результати комплексу чисельних експериментів за результатами яких установлено, що достовірність оцінки отриманих параметрів ударної хвилі декомпресії під час гільйотинного розриву циркуляційної петлі реактора ВВЕР-1000 з достатньою точністю здійснюється у межах розрахункового кроку інтегрування за часом $10^{-4}…10^{-3}$ с. Таким чином, отримані результати мають важливе практичне значення для подальшої процедури адаптивного вибору кроку інтегрування за часом.

У ***четвертому*** розділі за допомогою моделей, які розроблені у попередніх двох розділах дисертації, проведено розрахункові дослідження динамічного напруженого стану оболонки внутрішньокорпусної шахти реактора ВВЕР-1000 під час максимальної проєктної аварії. Часові залежності розподіл тиску на поверхні внутрішньокорпусної шахти, одержані за результатами гідродинамічного розрахунку реактора, були використані для оцінки безпеки реактора. Так були визначені максимальні динамічні переміщення оболонки внутрішньокорпусної шахти, нестаціонарний розподіл мембранних та згинних напружень за умови ударної декомпресії під час гільйотинного розриву циркуляційної петлі реактора ВВЕР-1000. Показано, що гідроудар під час максимальної проєктної аварії не може призвести до критичного зближення внутрішньокорпусної шахти до корпусу реактора, тому охолодження активної зони може відбуватись без перекриття зазору корпусом шахти. Також у розділі приведено результати наближеного розрахунки граничного стану оболонок внутрішньокорпусної шахти із постульованим дефектом.

У загальних ***висновках*** наведені головні наукові результати, отримані у дисертаційній роботі.

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 у співавторстві, 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 міжнародних наукових конференціях.

У списку опублікованих праць за темою дисертації є посилання на всі зазначені вище публікації здобувача. У тексті дисертації зроблено відповідні посилання, представлені у ній наукові результати висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Модальний аналіз та розрахунок вимушених коливань оболонки внутрішньокорпусної шахти реактора під час максимальної проєктної аварії проведено без врахування її взаємодії із теплоносієм та внутрішньокорпусними пристроями.

2. Внутрішньокорпусна шахта є зварною конструкцією із зоною перфорації на приблизно 20% її довжини, що, очевидно, впливає на нерівномірність розподілу напружень. Тим не менше, для побудови аналітичної моделі оболонки у роботі застосовано класичну теорію згину, верифікацію моделі проведено для однорідних конічних та циліндричних оболонок. Проте в роботі не вказано, чи була врахована в аналітичній моделі оболонки на відповідних ділянках геометрична та фізична неоднорідність в зоні перфорації та зварних швів.

3. Розв’язок рівнянь вимушених коливань оболонки під дією гідроудару в роботі побудовано у вигляді розкладу за власними формами (метод головних координат). При цьому враховано тільки перші чотири власні форми коливань, обґрунтовуючи це найменшою похибкою визначення їх власних частот порівняно із розв’язками для тривимірної скінченноелементної моделі. Для підтвердження справедливості такого усічення частот необхідно провести аналіз збіжності розв’язків або їх порівняння із розв’язком об’ємної задачі, враховуючи, що класичні рівняння коливань тонких пружних оболонок застосовуються для частот, коли довжина хвилі деформації більша, ніж товщина оболонки.

4. Для оцінки крихкої міцності оболонки внутрішньокорпусної шахти реактора з постульованою напівеліптичною тріщиною в осьовому та коловому напрямках в розділі 4 були використані аналітичні залежності для визначення КІН. Для підтвердження достовірності отриманих результатів і на наступних етапах проведення уточнених пружнопластичних розрахунків є доцільним застосування скінченноелементних моделей.

5. В розділі 2 приведено , на наш погляд, доволі громіздкі диференційні та аналітичні співвідношення. Щоб поліпшити їх зрозуміння, вони можуть бути виражені у матричній формі.

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 п.п. 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 у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент:
Завідувач відділу
коливань і вібраційної надійності
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
кандидат технічних наук, ст. досл. Олег ДЕРКАЧ

Підпис оф. опонента к.т.н., ст. досл. О.Л. Деркача
ЗАСВІДЧУЮ:
В.о. ученого секретаря
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
к.т.н., ст. досл. Світлана ТАРАСОВСЬКА

Національна академія наук України Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка м. Київ Ідентифікаційний код 05417319

М.П. 16 січня 2024 р.