

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шугайла Олексія Петровича

«Напружено-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях»,

представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** Атомна енергетика є стратегічною галуззю України, оскільки протягом останніх років АЕС виробляють понад 50% електроенергії країни, і цей обсяг має сталу тенденцію до зростання. В Українській атомній енергетиці використовуються парогенератори горизонтального типу. Досвід експлуатації показав, що вони мають ряд важливих переваг над вертикальними, як з точки зору надійності, так і безпеки. Надійна робота їх є найважливішим завданням для АЕС в усьому світі.

Зважаючи на вищевикладене, для елементів та конструкцій, важливих для безпеки залишається актуальним питання забезпечення і підтвердження їх працездатності (міцності, цілісності, геометричної стабільності тощо) в умовах нормальної експлуатації, та аварійних ситуаціях, як на етапі проектної, так і довгострокової експлуатації з урахуванням вимог чинних норм, правил та стандартів. Трубчасті елементи є складними тонкостінними оболонковими конструкціями з низкою нерегулярністю геометрії (місцеві потоншення, зломи поверхонь тощо). Тому для розрахунку напружено-деформованого стану теплообмінних трубок доцільно створювати нові, розвивати і застосовувати існуючі схеми методу скінчених елементів і програмні засоби для їх комп'ютерної реалізації. Це надає можливість розв'язувати такі **актуальні задачі механіки деформованого твердого тіла**, як виконання оцінок міцності і працездатності теплообмінних трубок при потенційно можливих проектних і запроектних аваріях, а також при екстремальних зовнішніх впливах.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність.** Обґрунтованість та вірогідність результатів

розрахунків напружено-деформованого стану теплообмінних трубок при різних режимах роботи парогенератора забезпечується:

- точним і детальним моделюванням геометрії і структури теплообмінних трубок, коректним врахуванням фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів;
- застосуванням скінченно-елементної моделі із оптимальним співвідношенням розмірів скінчених елементів, при яких забезпечується найкраща апроксимація параметрів напружено-деформованого стану функціями напружень і деформацій;
- обґрунтуванням оптимальності застосованої скінченно-елементної сітки обчислювальними експериментами;
- використанням кроку інтегрування, який забезпечує стабільність обчислювального процесу і збіг результатів розрахунку;
- 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.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, що викладені в дисертаційній роботі, виконано у відповідності з планами та науковими темами Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, а саме: «Динаміка складних оболонкових систем при дії розподілених та локальних нестационарних навантажень» (шифр 1.3.1. 402 - 16, № ДР 0115U005704, 2016 - 2019 рр.) та «Динамічне деформування елементів конструкцій сучасного машинобудування та стійкість і досяжність множин траєкторій механічних систем» (шифр 1.3.1. 410 - 17. № ДР 0117U000700, 2017 - 2021рр.).

**Новизна отриманих в дисертації наукових результатів** полягає в створенні математичного забезпечення для моделювання напружено-деформованого стану трубопроводів в зонах локальних потоншень. Аналіз

результатів розрахунку свідчить про те, що найбільш консервативною поверхнею потоншень, з погляду напружень, що виникають в трубопроводах, є поверхня еліпсоїду;

- адаптоване математичне забезпечення ANSYS для дослідження напружено-деформованого стану теплообмінних трубок в лінійній постановці (у пружній та пружно – пластичній області) на прямолінійній і криволінійній ділянках;

- вперше з метою достовірної оцінки напружено-деформованого стану теплообмінних трубок у місцях скупчення шламу, досліджено вплив його на формування граничних умов, що максимально наближені до реальної ситуації;

- створена фізично нелінійна розрахункова модель для визначення напружено-деформованого стану при потоншеннях трубок при температурних навантаженнях;

- вперше досліджена цілісність теплообмінних трубок в одночасних умовах аварії при осушенні парогенератора і з врахуванням моніторингу технічного стану їх, термін експлуатації яких наближається до вичерпання проектного ресурсу.

**Практичне значення результатів дослідження** полягає в тому, що розроблені математичні розрахункові моделі, алгоритми для використання програмного забезпечення ANSYS можуть бути застосовані (з незначними коригуваннями за необхідністю) для теоретичного дослідження поведінки парогенератора як в умовах нормальної експлуатації, та і в умовах аварійних ситуацій. Використання програмного забезпечення ANSYS дозволяє здійснювати розрахунки з метою:

- оцінки дотримання меж міцності та несучої спроможності теплообмінних трубок при аварійних ситуаціях;

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

- виконання протиаварійних циркулярів і приписів при заміні дефектної ділянки трубопроводу;

– проектування дієздатності теплообмінних трубок і умов, які вимагають їх глушіння, без проведення високо затратних пошукових експериментальних досліджень.

Результати даної роботи використані Експлуатуючою організацією (Відокремлений підрозділ ДП НАЕК «Енергоатом» «Рівненська АЕС») при оцінці умов експлуатації теплообмінних трубок енергоблоку №3 РАЭС для визначення поведінки теплообмінних трубок в умовах підживлення пустого парогенератора. Результати цієї роботи важливі з точки зору розробки стратегії керування аваріями, пов'язаними з підживленням парогенератора в умовах його підпушення при виникненні важких аварій.

Практичне значення отриманих у роботі результатів полягає в тому, що розв'язання нових практичних задач поведінки парогенератора складної геометрії при налипанні шламу при нестационарних термічних навантаженнях, а також адаптовані методи скінченно-елементні алгоритми та програми чисельного розв'язку задач, одержані в роботі, можуть бути використані для дослідження прикладних задач в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка, в Державному підприємстві «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», Державному підприємстві «НАЕК «Енергоатом», Національному технічному університету України ім. Ігоря Сікорського (Теплофізичний факультет, Механіко-машинобудівний інститут), в науково-дослідних та конструкторських організаціях, які займаються проектуванням парогенератора та обґрунтуванням його безпечної експлуатації.

Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України (Київ, 2019 р.); на семінарі секції за напрямком «Механіка оболонкових систем» Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України (Київ, 2019 р.); Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи з достатньою повнотою відображено у 12 роботах, зокрема: 8 статей у наукометричних фахових виданнях; 3 статті у фахових журналах і збірниках України; 6 робіт у збірниках матеріалів і праць міжнародних наукових конференцій. Опубліковані роботи з достатньою повнотою передають зміст дисертації.

**Апробація результатів роботи та публікації.** Дисертаційна робота пройшла достатньо повну апробацію. Матеріали дисертації були представлені на таких міжнародних конференціях:

– Международная конференция Украинского ядерного общества «УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ АЭС». 11 – 13 ноября 2002 г. Киев, Украина.

– Международная научно-техническая конференция «КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И РЕСУРС ОБОРУДОВАНИЯ АЭС». 2009 Киев.

– I Міжнародний семінар з розгляду та обговорення результатів розробки Національних звітів з управління старінням, які складені країнами-учасницями відповідно до директиви ЄС 2014/87/Euroatom в рамках діяльності ENSREG. 14 – 18 травня 2018 р. м. Люксембург.

– I Міжнародна науково – технічна конференція «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» 10 – 14 вересня 2018р. ІПМаш. м. Харків.

– VI Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики» 4 – 6 вересня 2018р. Одеський Національний політехнічний університет, м. Одеса.

Окремі положення дисертації періодично доповідались на наукових семінарах відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій (Київ, 2017–2019 р.). В повному обсязі дисертація доповідалася і обговорювалася на науковому семінарі відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій

**Оцінка змісту дисертації та завершеності в цілому.** Дисертація складається з анотації (українською та англійською), вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 186 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 172 сторінки машинописного тексту, в тому числі, 62 рисунків, 17 таблиць, 1 додаток на 1 сторінці.

В цілому дисертаційна робота Шугайла О.П. є завершеним науковим дослідженням. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту роботи і її основним положенням. Тексти дисертації і автореферату викладені на належному

науковому рівні. Загальні висновки дисертаційної роботи повністю відповідають її меті.

У першому розділі проведений огляд і аналіз праць вітчизняних та зарубіжних вчених з питань, розглянутих у дисертації. Аналіз сучасного стану розглянутої проблеми дозволяє зробити висновок, що на поточний час основну увагу всіх існуючих досліджень зосереджено на встановленні характеру та розмірів дефектів та їх впливу на поведінку теплообмінних трубок, складено також, так званий атлас дефектів і станів забруднення їх шламом. Певну увагу також приділено поведінці при додатковому тепловому опорі, але не досліджено саме вплив шару шламу на закріплення. Тому, цю роботу присвячено дослідженню впливу скупчення шару шламу на граничні і кінематичні умови закріплення трубок та їх напружено-деформованого стану із наступним визначенням спроможності теплообмінних трубок зберігати свою цілісність в умовах значного термосилового навантаження (аварія) з урахуванням їх поточного технічного стану. На підставі розгляду та аналізу існуючих результатів досліджень сформовано науково – технічну проблему: підвищення безпеки експлуатації та ефективності використання парогенераторів АЕС через визначення механізму пошкоджень в теплообмінних трубках, шляхів їх запобігання, а також керування термомеханічними процесами при аварійних ситуаціях

В другому розділі для достовірної оцінки міцності ділянки трубопроводу з локальними потоншеннями стінки розроблено методика, яка визначає таку геометричну і математичну модель потоншення, що надає можливість адекватно відобразити форму реального дефекту зносу. Варіантні розрахунки, які представлені у цьому розділі засвідчили, що найбільш консервативною з точки зору виникаючих напружень поверхнею зносу є еліпсоїд. Виходячи з цього, в подальших розрахунках, при геометричному моделюванні поверхонь з дефектами у вигляді потоншення або тріщини перевага буде надаватися поверхні еліпсоїду. Зроблено висновок про те, що при майже однакових параметрах втрати металу за рахунок потоншення або за наявності тріщини, більш значимий вплив на напружено-деформований стан надають дефекти у вигляді потоншень.

В третьому розділі отримані результати аналізу напружено-деформованого стану трубчатки в умовах зміни кінематичних та граничних характеристик через вплив шламу. Аналіз результатів свідчить про те, що: однією з основних причин пошкоджень теплообмінних трубок є забрудненість поверхні теплопередачі шламом/відкладенням; процес утворення та накопичення шламу/відкладення при експлуатації парогенератора відбувається поступово, чим більше кількість шламу, тим істотніше його вплив.

Для оцінки впливу шламу на теплообмінні трубки та умови їх опирання створено розрахункову модель 7 ліній теплообмінних трубок з використанням методу скінчених елементів, який реалізовано за допомогою програмного комплексу ANSYS та проведені ітераційні розрахунки аналізу напружено-деформованого стану теплообмінних трубок з метою визначення мінімально допустимого потоншення стінки їх на прямій ділянці і в області гину з врахуванням впливу шламу і температурних навантажень.

У четвертому розділі досліджено поведінку теплообмінних трубок парогенератора для оцінки їх цілісності в умовах підживлення зсушеного парогенератора, що призводить до суттєвого термомеханічного навантаження. При оцінці напружено-деформованого стану трубчатих елементів при аварійних ситуаціях в якості граничних початкових умов по температурі трубчатки на момент організації підживлення, параметрів у першому та другому контурі, а також температури охолоджуючої води використані результати теплогідравлічного аналізу. В якості найгіршого аварійного сценарію розглянуто таку подію як «Повне знеструмлення енергоблоку».

### **Зауваження по роботі**

1 Оскільки пластини, на яких встановлені теплообмінні трубки мають товщину 1,2 мм (пластини кріпляться до опорних елементів корпусу парогенератора без зварювання з наявністю деформаційного зазору) цікаво було б визначити зміщення центру ваги зашламованої ділянки трубчатки;

2 В дисертації не проаналізований аспект можливої втрати стійкості теплообмінних трубок при значних відстанях їх обпирання;

3 Не врахований вплив руху рідини в теплообмінних трубках на криволінійних ділянках.

Зроблені зауваження не впливають на загальний висновок щодо прийнятності результатів дисертаційної роботи Шугайла О.П., носять рекомендаційний характер і окреслюють напрями можливого продовження відповідних досліджень.

### Висновок

Тематика і одержані результати роботи відповідають спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла і профілю спеціалізованої вченої ради Д 26.166.01. Дисертаційна робота Шугайла О. П. «Напружено-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях», 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 Шугайло Олексій Петрович 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:  
Проректор з навчально-методичної  
роботи



Г.М. Тонкачєєв