

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

ШУГАЙЛО ОЛЕКСІЙ ПЕТРОВИЧ

УДК 539.3;621.039.58

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ПРИ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

*До друку*  
*голова спеціалізованої*  
*вченої ради №26.166.01 С.П.*  
*Інститут механіки ім. С.П.*  
*Тимошенка НАН України*  
*Т. І. Іванюк*  
*а. к. т. н. України*  
*С. П. Шугайло*  
*05417070*  
*07.18*  
*УКРАЇНА м. Київ*

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі будівельної механіки тонкостінних конструкцій Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Луговий Петро Захарович**  
в.о. завідувача відділу 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;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Чирков Олександр Юрійович,**  
провідний науковий співробітник відділу чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Захист відбудеться «24» вересня 2019 р. о 14:00 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 у бібліотеці Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України за адресою: 03057, м. Київ-57, вул. Нестерова, 3.

Автореферат розісланий «23» серпня 2019р.

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



**О.П. Жук**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Атомна енергетика є стратегічною галуззю України, виробляє понад 50% електроенергії країни, і цей обсяг має сталу тенденцію до зростання. В той же час в продовж поточної експлуатації енергоблоків АЕС України виявлено окремі недоліки вихідного проекту, які ставлять певні задачі, що потребують вирішення із залученням наукового потенціалу країни. В Українській атомній енергетиці використовуються парогенератори (ПГ) горизонтального типу. Досвід експлуатації показав, що горизонтальні ПГ мають ряд важливих переваг над вертикальними, як з точки зору надійності, так і безпеки. Надійна робота ПГ є найважливішим завданням для АЕС в усьому світі. Завдяки бездоганній роботі всіх компонентів АЕС, важливих для безпеки, і зокрема ПГ, досягається необхідний рівень безпеки та надійності виробництва електроенергії на АЕС.

Відповідно до рішень Уряду України, які викладені в «Енергетичній стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (розпорядження КМУ від 18 серпня 2017 р. № 605-р)» і в «Комплексній програмі робіт щодо подовження терміну експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій (постанова КМУ від 29.04.2004 № 263-р)» розроблені і впроваджуються заходи з обґрунтування можливості продовження строку експлуатації енергоблоків, а також забезпечення довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС за умови забезпечення безпеки на рівні, що відповідає вимогам сучасних норм, правил та стандартів з ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ), вимогам з безпеки МАГАТЕ та кращому міжнародного досвіду та практиці.

Конструктивна концепція ПГ, що застосовуються на АЕС з ВВЕР і питання вибору матеріалу трубчатки та можливості забезпечення її надійної роботи протягом проектного та понадпроектного строку служби вимагає розв'язку **актуальних задач механіки деформівного твердого тіла**, які виникли на базі досвіду експлуатації та при потенційно можливих проектних і запроектних аваріях.

**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: «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.), співвиконавцем яких був дисертант.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є поглиблений аналіз напружено-деформованого стану (НДС) та оцінка цілісності теплообмінних трубок (ТОТ) ПГ в умовах відкладення шару шламу та значного термосилового навантаження для прийняття обґрунтованого рішення при організації підживлення парогенераторів АЕС в умовах повного знеструмлення АЕС. Робота спрямована на підвищення рівня безпеки АЕС за рахунок удосконалення процедур керування аварією.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- створення розрахункової моделі трубок теплообмінної поверхні та елементів ПГ, що враховують взаємовплив приєднаного обладнання; дослідження впливу шару шламового відкладення на кінематичні та граничні умови закріплення і напружено-деформований стан ТОТ;
- визначення напруженого стану і параметрів руйнування теплообмінних трубок з урахуванням пружно-пластичної поведінки матеріалу і сучасних підходів моделювання;
- розроблення схематизації та розрахункових моделей пошкоджень ТОТ від впливу шару шламового відкладення і за результатами розрахункових досліджень оцінка впливу виявлених пошкоджень на цілісність ТОТ в умовах аварії;
- узагальнення результатів досліджень стосовно аналізу напружено-деформованого стану ТОТ з урахуванням впливу шару шламового відкладення для подальшої можливості формування удосконаленого алгоритму керування аварією в умовах повного знеструмлення ПГ.

**Об'єкт дослідження:** напружено-деформований стан пучка теплообмінних труб горизонтального парогенератора АЕС при аварійних ситуаціях.

**Предмет дослідження:** напружено-деформований стан трубопроводів з нерегулярністю геометрії і дефектами, вплив шару шламу (ерозійно-корозійного відкладення на ТОТ) на НДС і оцінка цілісності ТОТ ПГ в умовах значного термосилового навантаження для прийняття обґрунтованих рішень при ліквідації аварій і їх наслідків.

**Методи дослідження:** методи пружно-пластичного моделювання НДС циліндричних оболонок, які реалізовані з використанням скінчених елементів у ліцензійному програмному забезпеченні «ANSYS», розроблені засоби визначення НДС при нерегулярності геометрії (локальному потоншенні стінок) трубопроводів в лінійній постановці, за допомогою «ANSYS» розв'язані фізично нелінійні задачі оцінки НДС при наявності потоншення у стінці ТОТ при температурних і силових навантаженнях, а також методи механіки руйнування за наявності тріщини в ТОТ.

**Достовірність отриманих результатів,** обґрунтованість та вірогідність результатів розрахунків НДС ТОТ при різних режимах роботи ПГ забезпечується:

- точним і детальним моделюванням геометрії і структури ТОТ, коректним (реалістичним) врахуванням фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів;
- застосуванням скінчено-елементної (СЕ) моделі із оптимальним співвідношенням розмірів скінчених елементів, при яких забезпечується найкраща апроксимація параметрів НДС функціями напружень і деформацій;
- обґрунтуванням оптимальності застосованої СЕ-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.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– адаптовано математичний апарат для моделювання трубопроводів із нерегулярністю геометрії і оцінки НДС. Отримані результати розрахунку свідчать про те, що найбільш небезпечною поверхнею при моделюванні дефекту у вигляді потоншення стінки, з погляду напружень, що виникають в трубопроводах, є поверхня еліпсоїду;

– розроблено фізично нелінійну модель ТОТ для оцінки цілісності ТОТ при термосиловому навантаженні;

– вперше з метою достовірної оцінки НДС ТОТ у місцях утворення шару шламу, досліджено його вплив на формування граничних і кінематичних умов, в ситуації максимально наближеної до реальної;

– вперше досліджено цілісність ТОТ в умовах значного термосилового навантаження (аварії) при осушенні ПГ і з врахуванням поточного технічного стану ТОТ ПГ, термін експлуатації яких наближається до вичерпання проектного ресурсу;

– адаптоване математичне забезпечення “ANSYS” для дослідження НДС ТОТ з дефектами в лінійній постановці (у пружній та пружно – пластичній області) на прямолінійній і криволінійній ділянках ТОТ.

**Практичне значення отриманих результатів полягає в тому,** що вони 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» (ДНТЦ ЯРБ), 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 ПГ та обґрунтуванням його безпечної експлуатації.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати досліджень, одержані в дисертаційній роботі, належать її автору. Вибір теми, формування завдань та аналіз результатів проведених досліджень виконано спільно з науковим керівником. У наукових публікаціях, підготовлених у співавторстві, безпосередньо автором виконано таке: проведено математичне моделювання НДС ТОТ в зонах локальних потоншень [1-4], розробка та обґрунтування скінчено-елементних моделей трубчатки ПГ, виконано чисельні розрахунки НДС ПГ в умовах нормальної експлуатації та в умовах аварій [9], при цьому враховано поточний стан трубчатки ПГ за наявності шару шламового відкладення [12, 17], наявність дефектів, зростання тріщин, аналіз та обробка результатів розрахунків.

**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: 8 статей у наукометричних фахових виданнях [1, 3, 5 - 12]; 3 статті у фахових журналах і збірниках України [2, 4, 10]; 6 робіт у збірниках матеріалів і праць міжнародних наукових конференцій [13-18]. Опубліковані роботи з достатньою повнотою передають зміст дисертації.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з анотації (українською, російською та англійською), вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 188 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 171 сторінку машинописного тексту, в тому числі, 62 рисунків, 17 таблиць, 1 додаток на 1 сторінці.

Автор висловлює щире подяку своєму науковому керівникові доктору технічних наук, професору, Заслуженому діячу науки і техніки України, Лауреату державної премії в галузі науки і техніки України Петру Захаровичу 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.

У **першому** розділі висвітлені загальні питання розвитку методів розв’язання задач напружено–деформованого стану оболонкових конструкцій, наведених у монографіях В.А.Баженова, В.З.Власова, А.С.Вольміра, В.В.Гайдайчука, О.М. Гузя, В.І. Гуляєва, Я.М.Григоренка, В.Г.Карнаухова, В.Д.Кубенка, В.Ф.Мейша. П.З.Лугового, В.Г.Новожилова, Е.Рейснера, С.П.Тимошенка, О.Ю. Чиркова Ю.М.Шевченка, А.К Noor, N.J. Pagano та інших.

Ці роботи залишаються ґрунтовною математичною базою для побудови скінчено–різницевого чисельних методів розрахунку реальних конструкцій.

На основі аналізу виконаного огляду сучасного стану проблеми НДС та оцінки цілісності ТОТ ПГ в експлуатаційних умовах та умовах значного термосилового навантаження при аварійних навантаженнях, визначено місце даної роботи серед проведених раніше розробок і обґрунтовано вибір напрямків досліджень.

У **другому** розділі викладена постановка задачі і вивчено вплив локальних потоншень трубчатих елементів ПГ на їх НДС. Аналіз інтенсивності напружень для 3-х типів потоншення (1- еліптичний параболоїд; 2- еліпсоїд; 3 – еліптичний конус) свідчить, що найбільш небезпечною для виникаючих напружень поверхнею є еліпсоїд  $v = \frac{2}{3} Fh$ . Розроблені методи дослідження впливу потоншення стінок трубопроводів на їх НДС були адаптовані для застосування програмного комплексу «ANSYS».

ТОТ ПГ, які експлуатуються у важких хімічних та ерозійно-корозійних умовах мають різні випадки пошкоджень. Вони зумовлені наявністю дефектів двох основних типів: *потоншення стінки* (спричинене корозійною виразкою або плямою)

та тріщина (також спричинена корозійними процесами агресивного хімічного середовища експлуатації ПГ). Для оцінки впливу потоншення стінки на НДС ТОТ розглянуто допустиму товщину стінки для прямої ділянки та гину ТОТ. Розрахунки міцності ТОТ виконувались відповідно до «атомних» норм у пружній постановці. В цьому аналізі розглядаються потоншення ТОТ загального вигляду, які характеризуються наступними розмірами - див. Рис.2.1

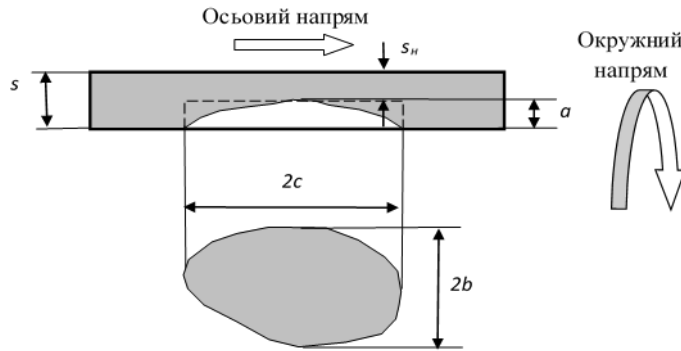


Рис. 2.1

В табл. 2.1 наведені результати розрахунків згідно існуючої Методики, коли не визначається глобальний НДС ТОТ і вплив температурних напружень: номінальне розрахункове напруження для прямої ТОТ,  $(\sigma)_1^n = \frac{P(D-s)}{2s}$  (2.1); напруження на внутрішній поверхні гину ТОТ,  $(\sigma)_1^n = \frac{P(D \cdot Y(\theta) - s)}{2s}$  (2.2); напруження з урахуванням сумісної дії внутрішнього тиску і згинального моменту на ТОТ  $\sigma_r^d = \frac{\sigma_r^{M_\varphi} / \alpha_M + \sqrt{(\sigma_r^{M_\varphi} / \alpha_M)^2 + 4(\sigma_\varphi / \alpha_p)^2}}{2}$  (2.3). Аналіз розрахунків показав, що при втраті товщини стінки ТОТ більше 50% напруження в ТОТ перевищують границю плинності.

Табл.2.1

Ступінь потоншення	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження (МПа) по (2.1)	Розрахункове напруження (МПа) по (2.2)	Розрахункове напруження $\sigma_r^d$ (МПа) по (2.3)	Границя міцності $R_m^T$ (МПа)
20%	177	60,43	65,46	70,42	412
30%	177	69,77	75,51	93,86	412
40%	177	82,21	88,91	111,15	412
50%	177	99,63	107,67	142,05	412
60%	177	125,77	135,81	194,85	412
70%	177	169,32	182,72	275,37	412
80%	177	256,43	276,53	673,83	412

Це свідчить про те, що у подальшому при визначенні НДС ТОТ з потоншеннями в аварійних ситуаціях їх розрахунок необхідно проводити у припущенні роботи матеріалу в пружно-пластичній зоні.

Для досконалого аналізу НДС ТОТ вибрана система диференційних рівнянь (2.1), які описують пружно-пластичний стан оболонок обертання змінної товщини з

довільною формою меридіана при дії вісесиметричних силових і теплових навантажень, які наведені нижче:

$$\begin{aligned}
 \frac{dr N_s}{ds} + \frac{r}{R_s} - N_\varphi \cos\theta + r q_s &= 0; & N_\varphi &= C_2 \varepsilon_s + C_1 \varepsilon_\varphi + K_2 x_s + K_1 x_\varphi - N_T; \\
 \frac{dr Q_s}{ds} - \frac{r}{R_s} N_s - N_\varphi \sin\theta + r q_s &= 0; & M_s &= K_1 \varepsilon_s + K_2 \varepsilon_\varphi + D_1 x_s + D_2 x_\varphi - M_T; \\
 \frac{dr M_s}{ds} - r Q_s - M_\varphi \cos\theta + r m_s &= 0; & M_\varphi &= K_2 \varepsilon_s + K_1 \varepsilon_\varphi + D_2 x_s + D_1 x_\varphi - M_T; \\
 \varepsilon_s &= \frac{u}{ds} + \frac{w}{R_s}; & C_1 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^*}{1-\nu^{*2}} d\zeta; & C_2 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{\nu^* E^*}{1-\nu^{*2}} d\zeta; \\
 \varepsilon_\varphi &= \frac{u}{r_0} \cos\theta + \frac{w}{r_0} \sin\theta; & K_1 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^* \zeta}{1-\nu^{*2}} d\zeta; & K_2 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{\nu^* E^*}{1-\nu^{*2}} \zeta^2 d\zeta; \\
 \chi_s &= \frac{d}{ds} \left( \frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds} \right) = \frac{dv}{ds}; & D_1 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^* \zeta^2}{1-\nu^{*2}} d\zeta; & D_2 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{\nu^* E^*}{1-\nu^{*2}} \zeta^2 d\zeta; \\
 \chi_y &= \frac{\cos\theta}{r_0} \left( \frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds} \right) = \frac{\cos\theta}{r_0} v; & N_T &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^*}{1-\nu^{*2}} \varepsilon_T d\zeta; & M_T &= \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^*}{1-\nu^{*2}} \varepsilon_T \zeta d\zeta \\
 v &= \frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds};
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Для розрахунку пружно - пластичних деформацій (починаючи з 3%) з допомогою ANSYS необхідно задати діаграму деформування матеріалу в координатах «інтенсивність напруження  $\sigma_i$  – інтенсивність деформацій  $\varepsilon_i$ ».

Задовільну відповідність експериментам дає степенева апроксимація діаграми деформування для введення в розрахунок пластичних деформацій (2.2):

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \begin{cases} E^T \varepsilon, & \sigma < R_{pe}^T, \\ K^T \varepsilon^\nu, & \sigma > R_{pe}^T, \end{cases} & K^T &= \frac{R_{pe}^T}{\varepsilon_{pe}^\nu} \varepsilon_{pe} = \frac{R_{pe}^T}{E^T} \\
 R_{pe}^T &= \left[ \frac{R_{p0,2}^T}{(R_{p0,2}^T + 0,002 E^T)^\nu} \right]^{\frac{1}{1-\nu}} & \nu &= \frac{0,731 \lg \left[ (1 + 0,014 Z^T) R_m^T / R_{p0,2}^T \right]}{\lg \left[ \frac{-2,3 E^T \lg(1 - Z^T / 100)}{R_{p0,2}^T + 0,002 E^T} \right]}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

де  $R_{pe}^T$  - показник зміцнення матеріалу;  $K^T$  –модуль зміцнення при заданій температурі;  $\nu$  - показник зміцнення;  $E^T$  – модуль пружності при заданій температурі. Отримана залежність для сталі 08X18H10T, з якої виготовлені ТОТ, наведена на Рис. 2.2 і добре узгоджується з експериментальними даними.

В програмному комплексі ANSYS використовується метод пружного розвантаження, який вважається найбільш адекватним та обґрунтованим для металевих оболонок обертання і підтверджується експериментальними дослідженнями.



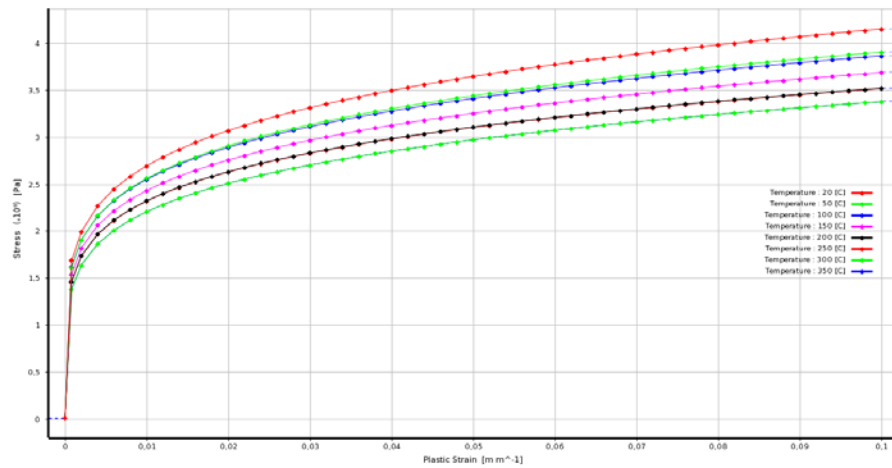


Рис. 2.2

Значна увага приділена розрахунку НДС ТОТ у ділянках їх згинання Рис.2.5. Зведені результати розрахунку впливу потоншення на напружений стан ТОТ при НУЕ (ділянка гину) наведені в Табл. 2.2.

Табл. 2.2

Ступінь потоншення	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження $\sigma_r^d$ (МПа) по (2.5)	Розрахункове напруження $(\sigma)_2$ (МПа) ANSYS Пружна постановка	Розрахункове напруження $(\sigma)_2$ (МПа) ANSYS Пружно-пластична постановка	Границя міцності $R_m^T$ (МПа)
20%	177	70,421	76	76	412
30%	177	93,864	93	93	412
40%	177	111,151	115	101	412
50%	177	142,046	145	138	412
60%	177	194,854	198	190	412
70%	177	275,373	285	280	412
80%	177	673,834	480	470	412

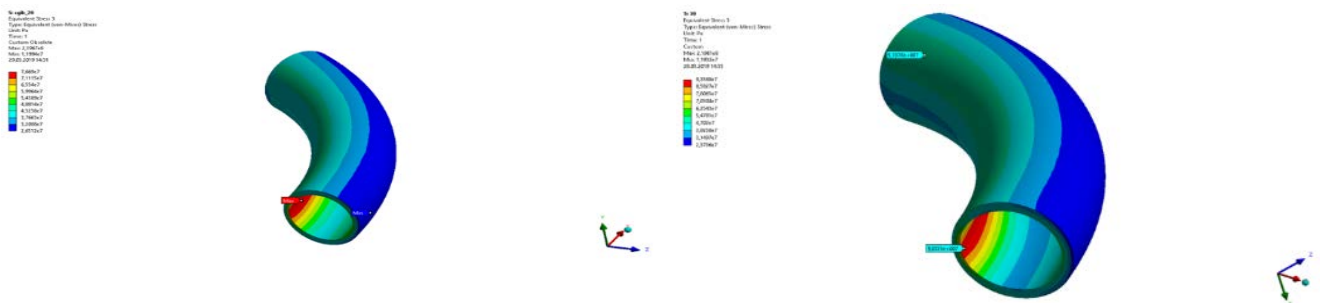


Рис. 2.4

Потоншення задано у вигляді дефекту загального вигляду із довжиною 40 мм із різним ступенем потоншення від 20% до 80%. У розрахунках прийняті

навантаження на ТОТ за нормальних умов експлуатації (НУЕ), тобто:  $\Delta P = 9,8 \text{ МПа}$ ;  $T^\circ = 350 \text{ }^\circ\text{C}$  (температура поверхні ТОТ); радіус ТОТ  $R = 0,008 \text{ м}$ ; товщина ТОТ  $h = 0,0015 \text{ м}$ ; радіус гину  $R = 0,6 \text{ м}$ .

Залежність НДС від ступеню потоншення представлена на Рис. 2.6. Аналіз розрахунків наведених в Табл.2.1 і Табл. 2.2 показав, що при втраті товщини стінки ТОТ більше 50% напруження в ТОТ перевищують границю плинності і при визначенні НДС ТОТ з потоншеннями в аварійних ситуаціях, їх розрахунок виконано у пружно-пластичній постановці.

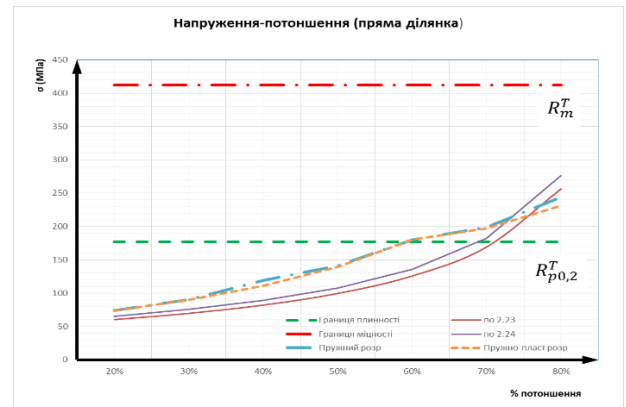


Рис. 2.3

Досліджено можливість руйнування ТОТ з погляду механіки руйнування при наявності тріщини з урахуванням її геометричних розмірів і стану матеріалу, з якого виготовлена ТОТ. Умову міцності в цьому випадку можна записати як  $K_I \leq K_{IC}$ , де  $K_{IC}$  – граничний КІН, який являє собою механічну характеристику матеріалу, що характеризує його опір зростанню тріщини при крихкому руйнуванні. У діапазоні температур 20–400 $^\circ\text{C}$  і приймаючи до уваги матеріал ТОТ, в якості критерію можна прийняти допустиме значення КІН:  $[K_I] = 55 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Саме ці критерії закладені в основу розрахунку тріщин за програмою ANSYS, яку використано в рамках цієї роботи. Умову міцності для ТОТ, що навантажені внутрішнім тиском і температурним впливом, згідно ПНАЭ Г-7-002-86, допускається визначати за формулою, в якій не враховуються термонапруження

$$K_I = \eta (\sigma_p M_p + \sigma_q M_q) \left( \pi \frac{a}{10^3} \right)^{1/2} / Q$$

По даній формулі для прямої ділянки ТОТ  $K_I = 1,713 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$

Постулювання тріщин виконано для зовнішньої і внутрішньої поверхні, бо причиною пошкодження ТОТ є недопустимий рівень питомої забрудненості як зовні, так і в середині поверхні ТОТ.

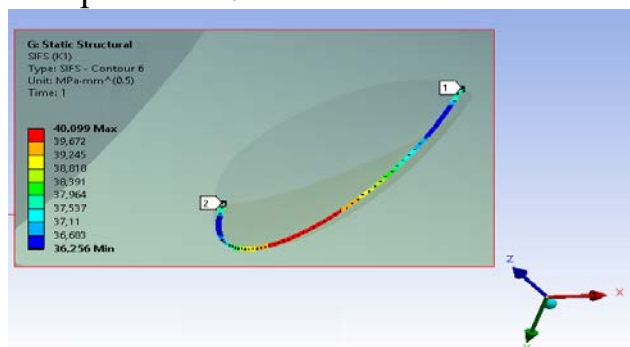


Рис. 2.5

На Рис. 2.5 представлений КІН розрахований з допомогою ANSYS, який добре узгоджується з аналітичним результатом (див. Табл. 2.3).

Табл. 2.3

Засіб	КІН	$K_I$	$[K_I]$
	МПа×м <sup>1/2</sup>		
Аналітичний розв'язок		1.713	55
Чисельний розв'язок (ANSYS)		1.290	

У третьому розділі вивчено розташування і вплив шламу на граничні і кінематичні умови і НДС ТОТ ПГ (див. Рис.3.1).

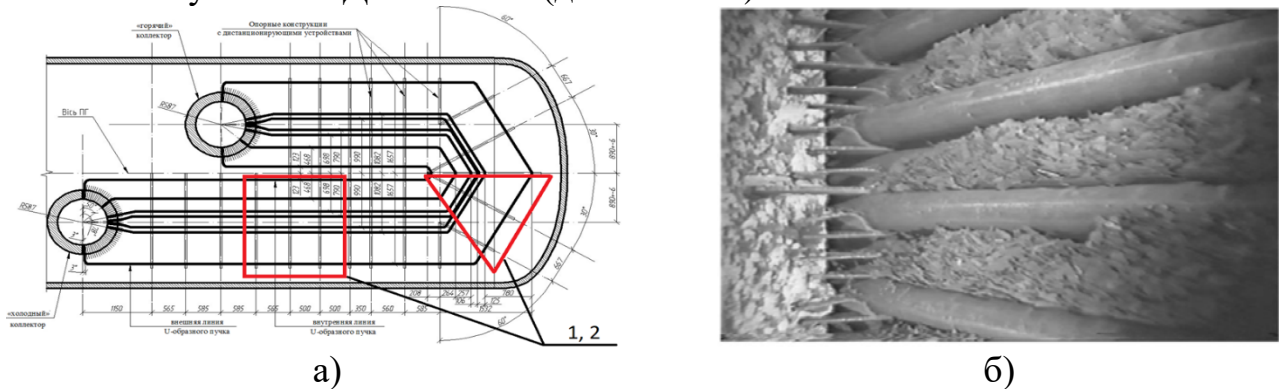


Рис.3.1

Згідно експериментальних даних на поверхні ТОТ утворюються відкладення або «шлам», які з часом збільшуються в об'ємі, можуть змінити граничні умови і призвести до виводу ТОТ з експлуатації методом глушіння ТОТ (Рис. 3.2).

Особливий інтерес представляють ділянки, розташовані у другій напівпетлі ПГ в зоні максимального скупчення шламових відкладень (Рис.3.1 «а»). В даному розділі виконано чисельний аналіз та оцінку впливу шламу на НДС ТОТ при аварійних ситуаціях.

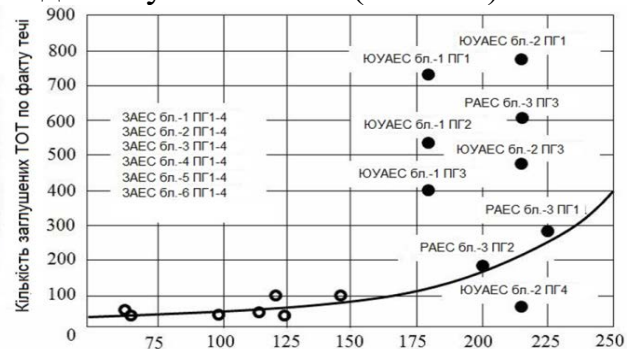


Рис. 3.2

Для вивчення впливу шламу на НДС ТОТ ПГ використані термопластичні рівняння (2.4) з відповідними граничними і температурними умовами. Побудована розрахункова модель ТОТ згідно проектної та експлуатаційної документації для використання комплексу ANSYS. Для аналізу НДС було обрано 3 лінії ТОТ зовнішнього U-подібного пучка і 4 лінії ТОТ внутрішнього U-подібного пучка (Рис.3.1 «а») і Рис. 3.3). При моделюванні ліній ТОТ використані 4-х вузлові оболонкові елементи типу SHELL181 (Рис. 3.4).

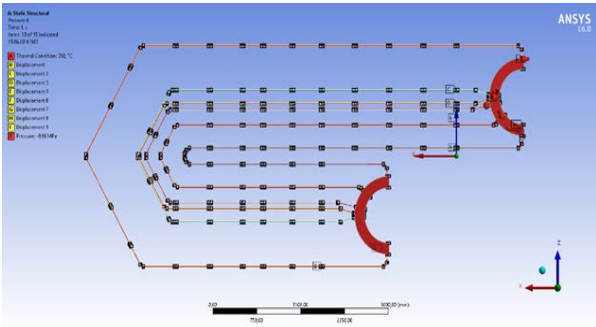


Рис. 3.3

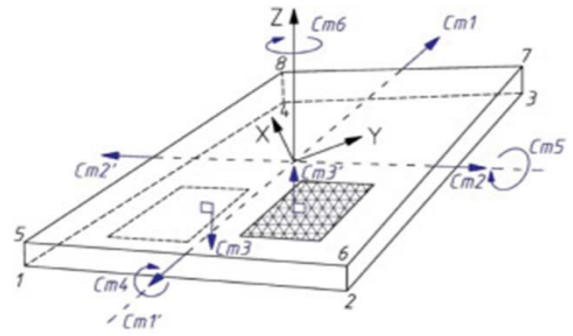
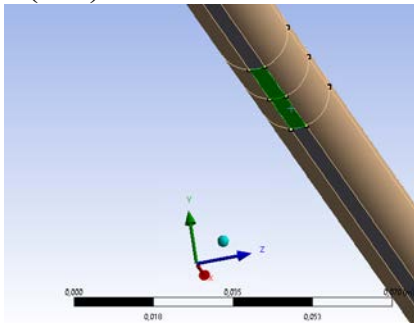
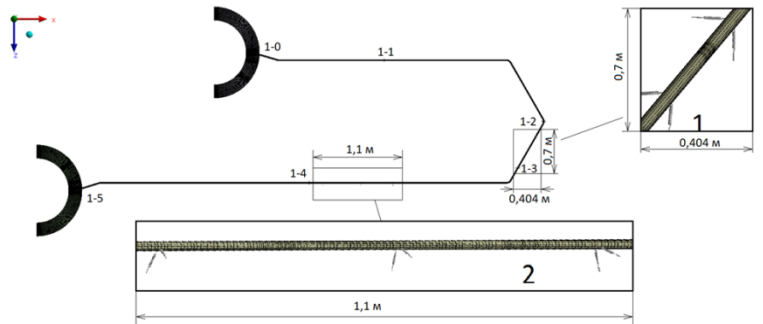


Рис.3.4

Скупчення шламу по довжині трубки та в опорних точках може призвести до зміни закладених в проектах НУЕ опирання трубки (граничних (ГУ) і кінематичних умов (КУ) Рис. 3.5.



а)



б)

Рис. 3.5

Визначений раціональний розмір SE (Рис. 3.6) для подальших розрахунків при НУЕ при практичній збіжності результатів. Відомості про результати розрахунку напружень при обраних сітках представлені на Рис. 3.5. Для розрахунку НУЕ обрано наступні вихідні дані:  $R_{TOT}=0,008\text{м}$ ;  $h_{TOT}=0,0015\text{м}$ ; Сталь 8Х18Н10Т;  $E=0,0185\text{ МПа}$ ; щільність -  $\rho_{TOT} = 8021\text{ кг/м}^3$ ; коефіцієнт Пуассона -  $\nu = 0,3$ ; щільність шламу -  $\rho=5530\text{ кг/м}^3$ , внутрішній тиск  $P_{BH} = 9.8\text{ МПа}$ ; приведена питома щільність ТОТ з теплоносієм  $\rho_{ПР} = 3555\text{кг/м}^3$ .

Результати розрахунку напружень у перетинах, що досліджуються для розрахункових випадків (Розрахунок 1 – Розрахунок 3) наведені на графіку Рис. 3.7.

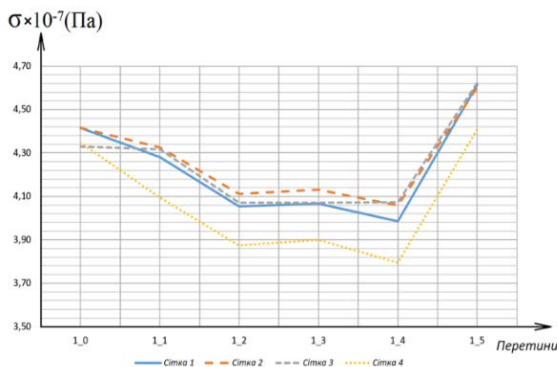


Рис. 3.6

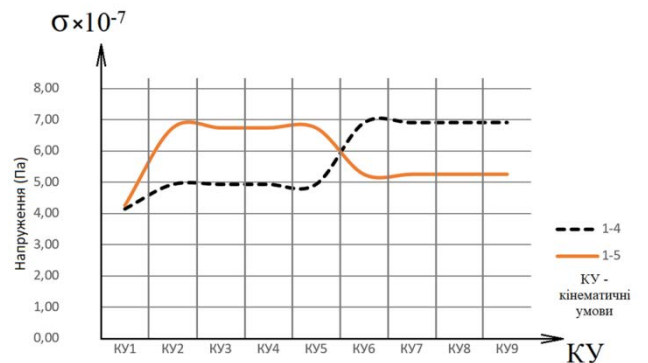


Рис. 3.7

Найбільш суттєва зміна напружень до 35% є характерною для перетинів 1-4 і 1-5 від зміни кінематичних і граничних умов Рис. 3.7. Це пояснюється тим, що довжина ТОТ досягає 15 метрів в залежності від трасування і додаткові жорсткі закріплення в одній половині петлі не впливають на іншу половину петлі.

В четвертому розділі виконано аналіз НДС та оцінку цілісності ТОТ ПГ в умовах суттєвого термомеханічного навантаження, яке обумовлено аварією. Вихідні дані аварії – «Повне знеструмлення енергоблоку» - осушення ПГ. Початок подавання живильної води Рис. 4.1; температура першого контуру Рис. 4.2; накладання кінематичних граничних умов Рис. 4.3.

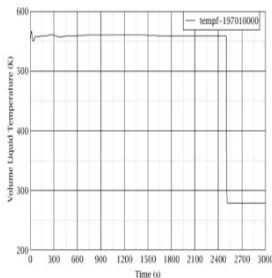


Рис. 4.1

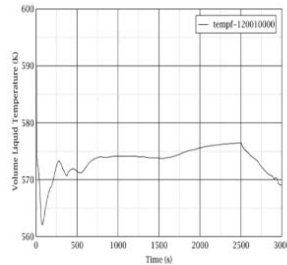


Рис. 4.2

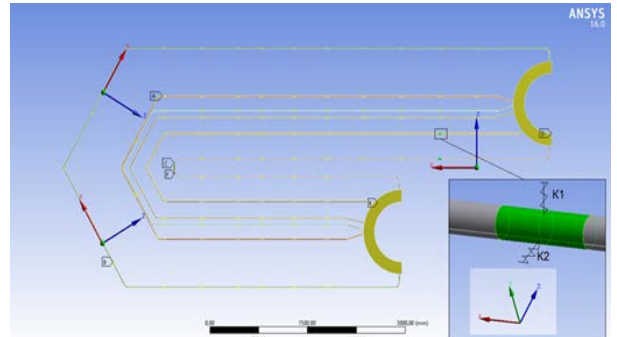


Рис. 4.3

З врахуванням викладених вище аспектів, аналіз НДС трубчатих елементів ПГ та оцінка цілісності ТОТ розглянуто для самого небезпечного перебігу аварії.

«Термомеханічне навантаження 1 (жорстке)» (з погляду виникнення термічних напружень) - в якості початкових умов по температурі на зовнішній поверхні теплообмінної трубки приймалось мінімальне значення температури, яке відповідає температурі, живильної води, що подається в ПГ і складає 5°C, а на внутрішній поверхні теплообмінної трубки значення температури приймалось 320°C.

1) «Оцінка НДС ТОТ з урахуванням нерегулярності геометрії при жорсткому термомеханічному навантаженні»

Оцінку цілісності трубчатки виконано за принципом субмоделінгу, загальна блок схема якого представлена на Рис. 4.4.

НДС трубчатки досліджується у часі від моменту початку перехідного процесу до моменту початку подавання аварійної живильної води на 2460 сек. Динаміка аварійного процесу і її вплив на НДС трубчатки досліджується для часових інтервалів 3 сек, 80 сек, 1375 сек, 2460 сек, 3000 сек. На момент часу 2460 сек температура води всередині ПГ складає близько 300°C і починається подавання аварійної живильної води з температурою 5°C.

Результати розрахунку свідчать про те, що при протіканні перехідного температурного процесу екстремуми напружень локалізуються в зонах різних опорних елементів по всій довжині трубки, що досліджується. Результати розрахунку наведені на Рис. 4.5.

Для подальшої оцінки цілісності трубчатки обрано зовнішню ТОТ верхнього шару трубчатки, яка має максимально великі відстані між опорними елементами, з максимальними температурними деформаціями.

Аналіз НДС ТОТ при жорсткому термомеханічному навантаженні свідчить про те, що найбільш навантаженою ділянкою є згин.

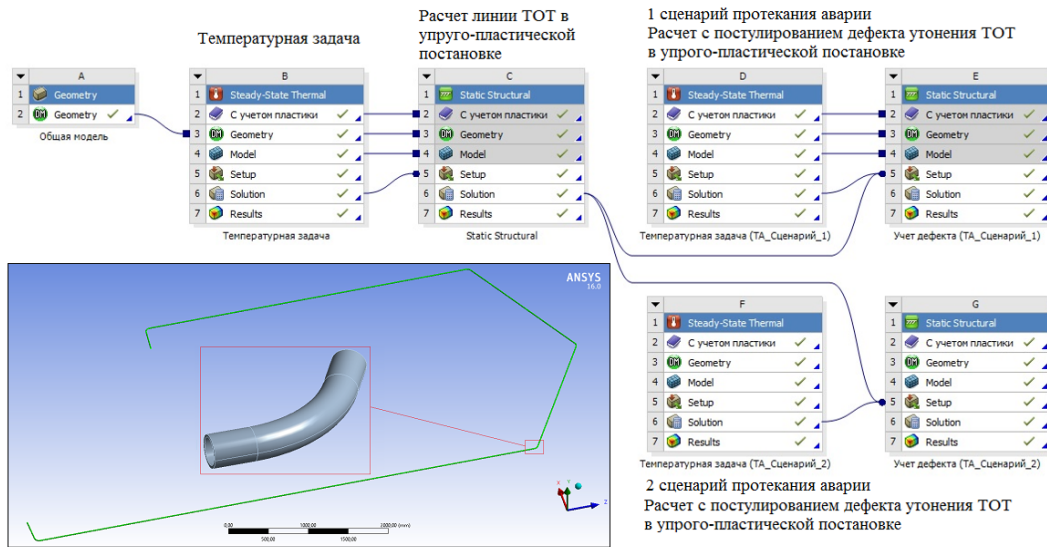


Рис. 4.4

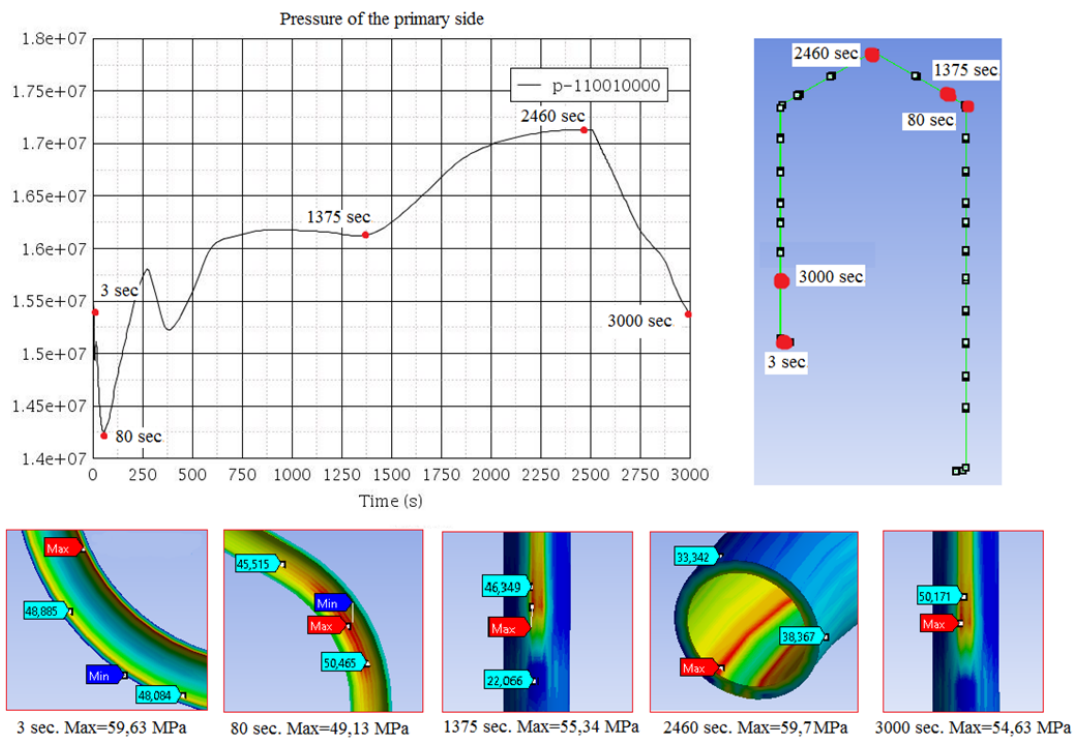


Рис. 4.5

Досліджена найбільш напружена ділянка трубопроводу, для якої постулюється втрата металу стінки від 20% до 80%. При заданих навантаженнях та кінематичних і граничних умовах (з урахуванням впливу шару шламу). Постановка задачі термопружності (див. Розділ 2, рівняння 2.4).

Дефект у вигляді локального потоншення стінки на згині ТОТ (Рис. 4.6) постулюється у місці локалізації максимальних напружень за результатами попереднього розрахунку. Максимальні значення напружень для потоншень 20%, 50%, 60%, 65%, 70% та 80 % в ТОТ наведені в Табл. 4.1

Проведений ітераційний аналіз визначення НДС для потоншень 20%, 50%, 60%, 65%, 70% та 80 % свідчить про те, що граничним значенням потоншення, при

якому виникає порушення цілісності ТОТ в умовах аварії є 70% втрати матеріалу від товщини стінки.

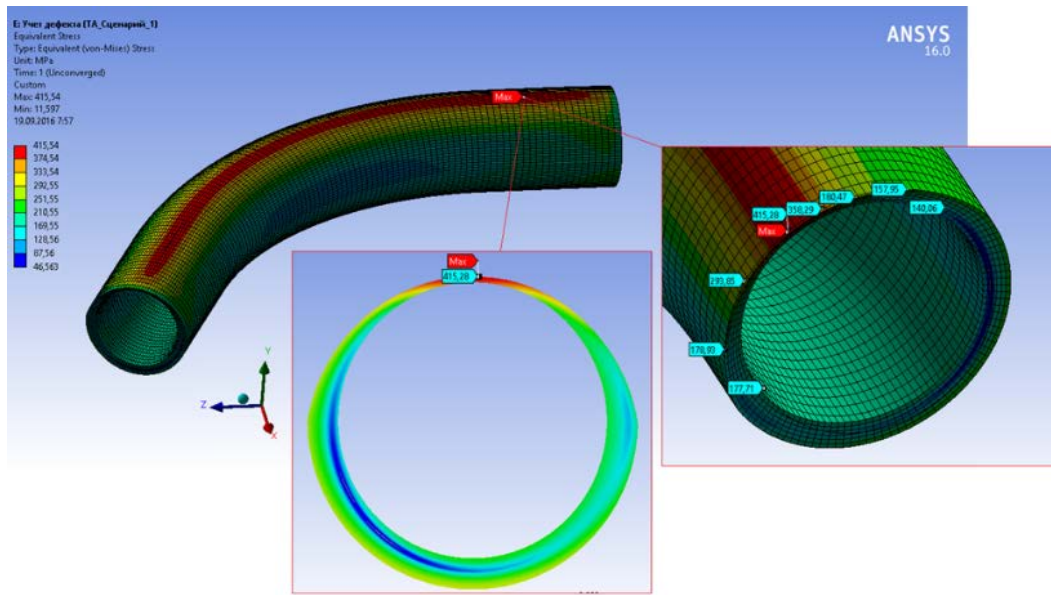


Рис. 4.6

Таблиця 4.1

Ступінь потоншення	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження $\sigma$ (МПа)	Границя міцності $R_m^T$ (МПа)
20%	177	255	412
50%	177	270	412
60%	177	305	412
65%	177	349	412
70%	177	382	412
80%	177	415	412

## 2) Оцінка НДС і цілісності ТОТ за наявності тріщини

Основні характеристики матеріалу, що використані у розрахунку, є критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Ic}$ , критична температура крихкості  $T_k$  і границя плинності  $R_{p0,2}$ .

Опір крихкому руйнуванню вважається дотриманим, якщо для обраного розрахункового дефекту у вигляді тріщини у режимі, що розглядається дотримується умова:  $K_I < [K_I]$  (див. розділ 2). Результати розрахунку КІН для жорсткого термомеханічного навантаження для ділянки гину представлені на Рис. 4.8.

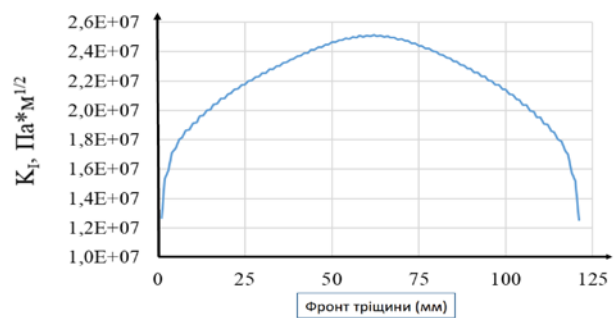


Рис. 4.8

Максимальні значення КІН за результатами розрахунку для гину ТОТ для жорсткого термомеханічного навантаження складають:  $K_{I_{max}} = 25,11 \text{ МПа} * \text{м}^{1/2}$ . Із зіставлення розрахункового і допустимого КІН (Табл. 4.2) слідує, що умови

крихкої міцності задовольняються із суттєвим запасом у випадку жорсткого термомеханічного навантаження. Результати розрахунку також засвідчили, що КІН залишається на одному рівні незалежно від того, що розглядається тріщина на зовнішній або внутрішній поверхні ТОТ. Така ситуація є характерною для тонкостінних оболонок і оболонок середньої товщини

Табл. 4.2

Тип навантаження	КІН	$K_I$ (МПа $\times$ м <sup>1/2</sup> )		[K <sub>I</sub> ]
		Пряма ділянка	Гин	
Термомеханічне навантаження 1		15,25	25,11	55
Термомеханічне навантаження 2		1,29	1,31	

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі найбільш вагомі наукові та практичні результати, які застосовані для підвищення рівня безпеки АЕС України, полягають у наступному:

1) Проаналізовано існуючі методи підвищення ефективності використання ПГ АЕС через визначення механізму пошкоджень в ТОТ, шляхів їх запобігання, а також керування термомеханічними процесами при аварійних ситуаціях;

2) Розглянуто різні геометричні і математичні моделі дефектів труб. Встановлено, що найбільш адекватною для моделювання є поверхня еліпсоїду у вигляді  $V = \frac{2}{3} Fh$ ;

3) Вивчено вплив дефектів у вигляді тріщини і у вигляді потоншення стінки ТОТ на її НДС і показано, що неврахування температурних напружень може призвести до небажаних результатів;

4) Для визначення НДС ТОТ за наявності дефектів адаптовано математичне забезпечення, яке засновано на використанні класичної теорії оболонок і створено розрахункову модель ТОТ. Визначення НДС ТОТ з дефектом у пружній та пружно-пластичній області на прямолінійній і криволінійній ділянках виконано із застосуванням ліцензійного програмного забезпечення “ANSYS”;

5) Вперше досліджено вплив шару шламу на граничні і кінематичні умови і НДС ТОТ ПГ, що призводить до збільшення напружень в ТОТ до 35%, наведено результати досліджень впливу наявності тріщин в ТОТ ПГ на їх НДС в залежності від їх характеру, розмірів і розташування з погляду механіки руйнування;

6) Вперше досліджено цілісність ТОТ в умовах жорсткого термомеханічного навантаження при аварії в умовах осушеного ПГ та при відновленні його підживлення з урахуванням поточного технічного стану ТОТ;

7) Встановлено, що найбільш впливовим пошкодженням ТОТ є втрата металу через корозію та ерозію. Умови експлуатації ПГ сприяють скупченню шламу на трубчатці ПГ, де діють додаткові навантаження, які збігаються із поточним технічним станом трубчатки ПГ, ресурс якого наближається до вичерпання,



призводять до питання, а як поведе себе така трубчатка в аварійних умовах при жорсткому термомеханічному навантаженні. За результатами цієї роботи встановлено таке:

- при самих несприятливих умовах при попаданні на стінку ТОТ холодної води з температурою 5°C, проведений ітераційний аналіз НДС для потоншень 20%, 50%, 60%, 65%, 70% та 80 % свідчить про те, що граничним значенням потоншення, при якому виникає порушення цілісності трубки теплообмінної поверхні в умовах аварії є 70% втрати матеріалу від товщини стінки.

- за умови наявності тріщини у стінці ТОТ результати розрахунку на опір руйнуванню при відстеженні зміни навантажень, що виникають, у часі свідчать про збереження цілісності ТОТ до 25% втрати товщини стінки ТОТ.

**Результати дисертаційної роботи знайшли своє відображення при:**

- обґрунтуванні можливості експлуатації парогенератору енергоблоку № 3 ВП «Рівненська АЕС» у понадпроектний період;

- виробленні стратегії управління аваріями, що пов'язані із підживленням парогенератора в умовах його осушення при виникненні важких аварій.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Луговой П.З., Шугайло А.П., Бажуков А.В., Биндус М.Б., Чучуй Н.Г., Крицкая Н.И. Методология и программные средства для определения предельного допустимого утонения стенок трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу (ЭКИ) // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, №1, 2003, – С. 65–73.

2. Крицкий В.Б., Луговой П.З., Шугайло А.П. Бажуков А.В., Биндус М.Г., Чучуй Н.Г. Методология оценки прочности фрагментов трубопроводов второго контура, подверженных эрозионно-коррозионному износу // Международный научно-технический сборник «Надежность и долговечность машин и сооружений» №1, 2004, – С. 130-136.

3. Шугайло А.П., Крицкий В.Б., Луговой П.З. Расчетное моделирование локальных утонений фрагментов трубопроводов, подверженных эрозионно-коррозионному износу, при определении напряженно-деформированного состояния конструкции в зоне дефекта // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, №4, 2005, – С. 66 – 70.

4. Шугайло А.П., Крицкий В.Б., Луговой П.З. Моделирование местных утончений на внутренней поверхности трубопроводов для определения напряженного состояния конструкции в зоне дефекта // Вісник національного авіаційного університету Том 1, № 27. 2006. – С. 80 – 82.

5. Шугайло А. П., Костенко С.П., Шугайло А-р П., Крицкий В. Б., Рыжов Д. И., Хамровская Л.В. К вопросу о переназначении допустимого числа циклов нагружения тепломеханического оборудования // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009 – Т.12, вип. 2. – С. 20 – 23.

6. Шугайло А. 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.

7. Shugailo O-i , Shugailo O-r, Ryzhov D. Strengthening the Capabilities of Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine through Interaction of Ukrainian and International Technical Safety Organizations in the Long Term Operation of South-Ukrainian NNP Unit 1 // Ядерна та радіаційна безпека. – 2015, № 2. – С. 27 – 30.

8. Матченко Т.І., Матченко П.Т., Шугайло О-й. П., Ляшенко Л.А., Панченко А.В. Аналіз підходів до оцінки витривалості та тріщиностійкості елементів металевих конструкцій // Ядерна та радіаційна безпека. – 2017, № 1. – С. 49 – 55.

9. Шугайло А. П., Мустафін М.А., Шугайло А-р П., Рыжов Д. И. Жабин О.И. Основные результаты оценки целостности теплообменных трубок парогенератора энергоблока № 3 Ривненской АЭС в процессе управления аварией // Ядерна та радіаційна безпека. – 2017, № 3. – С. 18 – 24.

10. Патент України № 69555. Зразок для дослідження напружено – деформованого стану трубопроводів з локальним стоншенням. Автори: Гарф Е.Ф., Шугайло О-р. П., Крицький В.Б., Шидловський М.С., Шугайло О-й. П. Опубліковано: 15.09.2004.

11. Шугайло А. П., Плачков Г. И., Гребенюк Ю. П., Шевченко И. А., Дыбач А. М., Зеленый О. В., Москалишин Р. И. Основные результаты анализа управления старением атомных электростанций в Украине // Ядерна та радіаційна безпека. – 2018, № 3. – С. 3 – 11.

12. Луговой П.З., Шугайло А.П., Круглий Я.Д., Колупаев А.М. Влияние шлама на напряженно – деформированное состояние теплообменных труб парогенератора // Прикл. механика. – 2019. 54. № 1 С. 99 – 108 .

13. Крицкий В.Б., Луговой П.З., Шугайло А. П., Биндус М.Б., Крицкая Н.И. Методология и программное обеспечение для определения предельного допустимого утонения стенок трубопроводов, подверженных эрозивно-коррозионному износу // Международная конференция Украинского ядерного общества “УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ АЭС”. 11 – 13 ноября 2002 г. Киев, Украина. Сб.тез.докл. – С. – 20.

14. Шугайло А. П., Костенко С.П., Шугайло А-р П., Крицкий В. Б., Хамровская Л.В., Черняк Я.П. К вопросу о переназначении циклов нагружения тепломеханического оборудования // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И РЕСУРС ОБОРУДОВАНИЯ АЭС “РЕСУРС - 2009”. К.: 2009. – С.179 – 180.

15. Шугайло О.П. Управління старінням. Тематична доповідь щодо корпусу реактору // 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 // Доповіді розміщені на сайті ENSREG.

16. Шугайло О.П. Управління старінням. Тематична доповідь щодо підземних трубопроводів // Там же.

17. Луговой П.З., Шугайло А.П., Колупаев А.М. Разработка расчетной модели теплообменных труб парогенератора с учетом влияния зон скопления шлама на

граничные условия // I Міжнародна науково – технічна конференція “Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні” 10 – 14 вересня 2018р. ПМаш. Харків. – С.107 – 108.

18. Москалишин Р.І., Шугайло О.П., Черняк Я.П., Брік Д.С. Загальний стан управління старінням обладнання та трубопроводів атомних електростанцій України // VI міжнародна науково-практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики» 4 – 6 вересня 2018р. Одеський Національний політехнічний університет, м. Одеса. Збірник тез доповідей – С.88 – 92.

## АНОТАЦІЯ

**Шугайло О.П.** Напружено-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 «Механіка деформівного твердого тіла». – Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України, Київ, 2019.

Дисертацію присвячено оцінці цілісності теплообмінних труб (ТОТ) парогенератора (ПГ) для прийняття коректних та технічно обґрунтованих рішень при організації підживлення парогенераторів АЕС в умовах повного знеструмлення майданчику АЕС.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, дано загальну характеристику роботи, доведено необхідність проведення наукових досліджень, сформульовано мету і задачі дослідження, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. У **першому** розділі проаналізовано існуючі методи підвищення ефективності використання ПГ АЕС через визначення механізму пошкоджень в ТОТ, а також керування термомеханічними процесами при аварійних ситуаціях. У **другому** розділі вивчено вплив нерегулярності геометрії трубчатих елементів парогенераторів на їх напружено деформований стан (НДС). У **третьому** розділі розроблено методіку дослідження розташування і вплив відкладення шару шламу на граничні і кінематичні умови і НДС трубчатих елементів ПГ. Наведено результати досліджень впливу наявності тріщин в трубчатих елементах парогенераторів на їх НДС в залежності від їх характеру, розмірів і розташування. У **четвертому** розділі виконано аналіз НДС та оцінку цілісності ТОТ ПГ в умовах термосилового навантаження в залежності від параметрів перехідного аварійного процесу. Це дало можливість удосконалити інструкцію керування перехідним процесом при аварійній ситуації для прийняття обґрунтованих рішень для запобігання проектних і за проектних аварій і ліквідації їх наслідків.

**Ключові слова:** парогенератор, теплообмінна трубка, нерегулярність, трубчатка, метод скінченних елементів, ANSYS, старіння, шлам, напружено-деформований стан.

## ANNOTATION

*Shugailo O.P.* Stress and Strain State of Tubular Elements of Steam Generators under Accident Conditions – Manuscript copyright qualifying doctoral thesis.

Doctoral thesis for the Philosophy Doctor's degree (Candidate of Technical Sciences) by specialty 01.02.04 "The Mechanics of Deformed Solids". – Institute of Mechanics named by S.P.Timoshenko of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the assessment of the steam generator (SG) heat exchangers tubes (HET) structural integrity for the correct and technically justified decision-making under feeding organization of an NPP steam generator in case of total NPP site blackout.

The **introduction** covers relevancy of the chosen doctoral thesis, general characteristic of the paper, the proofs for the necessity of conducting scientific researches, elaborated aim and tasks of the investigation, indications of the interconnection of the paper with other scientific programs, themes, plans. The existing methods of NPP SG efficiency increasing based on definition of HET degradation mechanisms, ways to prevent them and to control thermomechanical processes under emergencies have been analyzed in the **first** section. The impact of geometry irregularity of SG tubular elements on their stress and strain state has been studied in the **second** section. The methodology of investigation of location and impact of sludge layer on the boundary and cinematic conditions and stress and strain state of SG tubular elements have been developed in the **third** section. The results of investigation of impact of existing cracks in the tubular elements on their stress and strain state depending their characteristics, dimensions and location have been presented there as well. a stress and strain state analysis and evaluation of structural integrity of SG tubular elements under sufficient thermomechanical loads depending on transient process parameters was performed in the **fourth** section. All the aforementioned issues gave an opportunity to improve the instruction for managing the transient process during an emergency for a justified decision-making to prevent design and beyond design accidents and liquidation of their consequences.

**Key words:** *steam generator, heat exchanger tube, irregularity, tubular, finite elements method, ANSYS, ageing, sludge, stress and strain state.*

## АННОТАЦИЯ

**Шугайло А.П.** Напряженно-деформированное состояние трубчатых элементов парогенераторов при аварийных ситуациях – Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформированного твердого тела». – Институт механики имени С.П. Тимошенко НАН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена оценке целостности теплообменных труб (ТОТ) парогенератора (ПГ) для принятия корректных и технически обоснованных решений при организации подпитки парогенераторов АЭС в условиях полного обесточивания площадки АЭС.

Во **вступлении** обосновано актуальность выбранной темы диссертации, дано общую характеристику работы, подтверждено необходимость проведения научных

исследований, продемонстрировано связь работы с научными программами, темами, планами. В **первом** разделе проанализированы существующие методы повышения эффективности использования ПГ АЭС на основе определения механизма повреждений в ТОТ, путей их предотвращения, а также управления термомеханическими процессами при аварийных ситуациях. Во **втором** разделе изучено влияние нерегулярности геометрии трубчатых элементов парогенераторов на их НДС. В **третьем** разделе разработана методика исследования расположения и влияния отложения шлама на граничные и кинематические условия и НДС трубчатых элементов парогенераторов. Представлены результаты исследований влияния наличия трещины в трубчатых элементах парогенератора на их НДС в зависимости от их характера, размеров и расположения. В **четвёртом** разделе выполнен анализ НДС и оценка целостности трубчатых элементов парогенератора в условиях существенного термосилового нагружения в зависимости от параметров переходного аварийного процесса. Это дало возможность усовершенствовать инструкцию управления переходным процессом при аварийной ситуации для принятия обоснованных решений для предотвращения проектных и запроектных аварий и ликвидации их последствий.

**Ключевые слова:** *парогенератор, теплообменная трубка, нерегулярность, трубчатка, метод конечных элементов, ANSYS, старение, шлам, напряженно-деформированное состояние.*