

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

ШУГАЙЛО ОЛЕКСІЙ ПЕТРОВИЧ

УДК 539.3;621.039.58

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ПРИ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Спеціальність 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.П. Шугайло

Науковий керівник:

Луговий Петро Захарович,

доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Шугайло О.П. Напружене-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня Доктора філософії (кандидат 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 обґрутованих рішень при організації підживлення парогенераторів АЕС в умовах повного електрозвнеструмлення майданчику АЕС.

У **вступі** обґрутовано 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 НДС. У **третьому** розділі розроблено методику дослідження розташування і вплив відкладення шару шламу на граничні і кінематичні умови і НДС трубчатих елементів парогенераторів. Наведено результати досліджень впливу наявності тріщини в трубчатих елементах парогенераторів на їх НДС в залежності від їх характеру, розмірів і розташування. У **четвертому** розділі виконано аналіз НДС та оцінку цілісності трубчатих елементів парогенератора в умовах значного термосилового навантаження в залежності від параметрів перехідного аварійного процесу. Це дало можливість удосконалити інструкцію керування перехідним процесом при аварійній ситуації для прийняття обґрутованих рішень для запобігання проектних і запроектних аварій і ліквідації їх наслідків.

Ключові слова: парогенератор, теплообмінна трубка, нерегулярність, трубчастка, метод скінчених 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 situation 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 – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени Доктора философии (кандидат 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 разработано методику исследования расположения и влияния отложения шлама на граничные и кинематические условия и НДС трубчатых элементов парогенераторов. Представлено 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.*

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЕС	- атомна електрична станція
ВСК	- вихрострумовий контроль
ВВЕР	- Водо-водяний енергетичний реактор
ВП	- вихідна подія
ГЦК	- головний циркуляційний контур
ГК	- гарячий колектор
ГУ	- граничні умови
ДНТЦ ЯРБ	- Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки
ЄС	- Європейська Комісія
ЕКП	- ерозійно-корозійні пошкодження
ЗАЕС	- Запорізька Атомна Електрична Станція
ІЛА	- інструкція з ліквідації аварій
КІН	- коефіцієнт інтенсивності напружень
КУ	- кінематичні умови
КЯР США	- Комісія Ядерного Регулювання Сполучених Штатів Америки
МАГАТЕ	- Міжнародна агенція з атомної енергії
МРЗ	- максимальний розрахунковий землетрус
МСЕ	- метод скінченних елементів
НАЕК	- Національна Атомна Енергогенеруюча Компанія
НДС	- напружено-деформований стан
НУЕ	- нормальні умови експлуатації
ПГ	- парогенератор
ПНАЭ	- «Правила и Нормы в Атомной Энергетике»
РАЕС	- Рівненська Атомна Електрична Станція

РУ	- реакторна установка
ТОТ	- теплообмінна трубка
ХК	- холодний колектор
ШРУ-К	- швидкодіюча редукційна установка скиду пари у колектор
ЯУ	- Ядерна установка
ЮУАЕС	- Южно-Українська Атомна Електрична Станція
ViSA	- Visual System Analyzer (аналізатор візуальних систем)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ І ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	20
1.1 Огляд попередніх робіт з визначення напружене-деформованого стану теплообмінних труб парогенератора для оцінки їх поведінки при аваріях.....	20
1.2 Важливість результатів роботи з погляду визначення стратегії управління аваріями.....	37
Висновки і постановка задачі	38
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ПОТОНШЕНЬ ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ НА ЇХ НДС.....	41
2.1. Вплив локальних потоншень трубчатих елементів парогенераторів і трубопроводів ядерних установок на їх НДС	41
2.1.1 Регулюючі вимоги до експлуатації трубопроводів з ЕКП і існуючі підходи до визначення граничного потоншення	43
2.1.2 Запропоновані підходи до вирішення проблеми	44
2.1.3 Виконання розрахунків з визначення консервативної форми моделювання дефекту	46
2.2. Визначення допустимих товщин елементів трубопроводів	59
2.2.1 Визначення ступеню небезпеки тріщини з урахуванням її геометричних розмірів.....	60
2.2.2 Визначення мінімально-допустимої товщини стінки трубопроводу	67
Висновки по розділу 2	89
РОЗДІЛ 3. РОЗТАШУВАННЯ І ВПЛИВ ШЛАМУ НА ГРАНИЧНІ УМОВИ І НДС ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ.....	92
3.1 Визначення параметрів та характеристик шlamu	92

3.2 Визначення впливу шламу на НДС ТОТ ПГ.....	100
3.2.1 Побудова та верифікація розрахункової моделі	100
3.2.2 Аналіз НДС трубчатки в умовах зміни кінематичних та граничних умов через вплив шламу	112
3.2.3 Аналіз НДС трубчатки в умовах додаткової маси шару відкладення.....	116
Висновки по розділу 3	120
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ НДС ТА ОЦІНКА ЦІЛІСНОСТІ ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПГ В УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	123
4.1 Формування вихідних даних для розрахунку НДС ТОТ ПГ.....	123
4.2 Оцінка НДС і цілісності ТОТ за наявності нерегулярності геометрії.....	125
4.3 Оцінка НДС і цілісності ТОТ за наявності тріщини	138
Висновки по розділу 4	144
ВИСНОВКИ.....	147
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	150

ВСТУП

Актуальність роботи.

Атомна енергетика є стратегічною галуззю України, виробляє понад 50% електроенергії країни, і цей обсяг має стала 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 застосуванням 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.

Розглянута конструктивна концепція ПГ, що застосовуються на АЕС з ВВЕР і питання вибору матеріалу трубчатки та можливості забезпечення її надійної роботи протягом проектного терміну служби. Описані напрямки розвитку конструкції на базі досвіду експлуатації.

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.

Зважаючи на вищевикладене, для елементів та конструкцій, важливих для безпеки актуальною залишається задача забезпечення і підтвердження їх працездатності (міцності, цілісності, геометричної стабільності тощо) в умовах нормальній експлуатації, порушенні нормальної експлуатації та аварійної ситуації, як на етапі проектної, так і довгострокової експлуатації з урахуванням вимог чинних норм, правил та стандартів з ЯРБ, які зазвичай є більш жорсткими, ніж вимоги нормативних документів, що застосовувались на етапі первинного проектування і вже скасовані. В низці випадків наявні загальні вимоги з безпеки, викладені в нормативно-правових актах Держatomрегулювання, але відсутні детальні технічні вимоги до методів розрахунку, зокрема для визначення НДС трубчатих елементів ПГ. Обмеженість нормативно регламентованих проектних і експлуатаційних методів оцінки технічного стану конструкцій, систем і елементів енергоблоків АЕС є важливою мотивацією для створення інструментарію математичного моделювання і оцінки технічного стану ТОТ в процесі їх нормальної експлуатації і в аварійних умовах, оскільки наявні нормативні документи не передбачають дослідження НДС і міцності пошкодженої ділянки трубопроводу. Такий загальний підхід не зовсім обґрунтований і може привести як до продовження експлуатації трубопроводу з недостатнім запасом міцності, так і до необґрунтованої заміни ділянки трубопроводу (стосовно трубок теплообмінної поверхні відбувається виведення трубки із експлуатації за рахунок її глушіння).

Для моделювання НДС ТОТ при їх експлуатації в агресивних хімічних та складних корозійних умовах і термосилових навантажень можна використовувати відомі теорії шаруватих оболонок і теорію оболонок на пружній основі. Зазначені теорії є надійним підґрунтям для розробки нових і розвитку існуючих методів скінчених елементів (МСЕ) і програмних засобів для дослідження НДС ТОТ і їх комп’ютерної реалізації. Це надає можливість розв’язувати такі **актуальні задачі механіки деформованого твердого тіла**, як виконання оцінок НДС, міцності і

працездатності трубчатих елементів ПГ 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, 2016-2019рр.) та «Динамічне деформування елементів конструкцій сучасного машинобудування та стійкість і досяжність множин траекторій механічних систем» (шифр 1.3.1. 410 - 17. № ДР 0117U000700, 2017 – 2021 роки), співвиконавцем яких був дисертант.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є поглиблений аналіз НДС та оцінка цілісності ТОТ ПГ в умовах відкладення шару шламу та значного термосилового навантаження для прийняття обґрунтованого рішення при організації підживлення парогенераторів АЕС в умовах повного знецтрумлення 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 аварій;

– узагальнення результатів досліджень стосовно аналізу напруженодеформованого 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 (накопиченого 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 потоншенні стінок ТОТ при температурних і силових навантаженнях, а також методи механіки руйнування за наявності тріщин 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 МСЕ-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 свідчить 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.

Результати дисертаційної роботи використанні при:

- при обґрунтуванні можливості експлуатації парогенератору енергоблоку № 3 у понадпроектний період;
- виробленні стратегії управління важкими аваріями, які пов’язані із підживленням ПГ в умовах його осушення при виникненні важких аварій та відображені у звіті «Технический отчет «Оценка целостности теплообменных трубок парогенераторов третьего энергоблока Ровенской АЭС во время управления аварией» (выполнен по контракту №6F-30301 между ООО «UCHICAGO ARGONE» и ГП «ГНТЦ ЯРБ»)», Київ, 2016»;
- розробці «Національного звіту до першої тематичної партнерської перевірки за напрямом управління старінням» підготовленого в рамках першої тематичної партнерської перевірки на виконання Україною плану заходів з імплементації Угоди про асоціацію між Україною, з одного боку, та Європейським Співтовариством з атомної енергії.
- підготовці державних експертіз з ядерної та радіаційної безпеки, які стосуються оцінки на відповідність вимогам чинних норм, правил та стандартів, що діють в атомній енергетиці документів експлуатуючої організації щодо обґрунтування

продовження строку експлуатації парогенераторів енергоблоків №3 ВП «Рівненська АЕС», №1 та 2 «Южно-Українська АЕС», №1, 2 та 3 «Запорізької АЕС».

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: розробка та обґрунтування скінчено-елементних моделей трубчатки ПГ, чисельні розрахунки напруженого стану та визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень трубчатки ПГ в умовах нормальній експлуатації та в умовах аварій, при цьому враховано поточний стан трубчатки ПГ за наявності шару шламового відкладення, наявність дефектів, зростання тріщини, аналіз та обробка результатів розрахунків.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових форумах, міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах:

– 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 эрозионно-корозионному износу // Международная конференция Украинского ядерного общества “УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ АЭС”. 11 – 13 ноября 2002 г. Киев, Украина. Збірник тез доповідей. – С. – 20.

– 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.

– 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 за адресою http://www.ensreg.eu/protected-node?destination=node/4112&back=http%253A%252F%252Fwww.ensreg.eu%252Fcountry-specific-reports%252FEU-Member-States&protected_page=4112.

– Шугайло О.П. Управління старінням. Тематична доповідь щодо підземних трубопроводів // 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 за адресою http://www.ensreg.eu/protected-node?destination=node/4112&back=http%253A%252F%252Fwww.ensreg.eu%252Fcountry-specific-reports%252FEU-Member-States&protected_page=4112

– 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. ІПМаш. м. Харків. Збірник тез доповідей С.107-108.

– 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.88-90.

Список публікацій здобувача. Основні результати досліджень, які представлені в дисертації, опубліковано у 12 наукових працях, усі з яких входять до

складу наукових фахових видань України та іноземних держав, що включені до міжнародних наукометричних баз, а саме:

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. Патент України № 69555. Зразок для дослідження напруженого – деформованого стану трубопроводів з локальним стоньшенням. Автори: Гарф Е.Ф., Шугайло О-р.П., Крицький В.Б., Шидловський М.С., Шугайло О-й. П. Опубліковано: 15.09.2004.
4. 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.
5. Шугайло А.П., Крицкий В.Б., Луговой П.З. Моделирование местных утонений на внутренней поверхности трубопроводов для определения напряженного состояния конструкции в зоне дефекта // Вісник національного авіаційного університету Том 1, № 27. 2006. – С. 80 – 82.
6. 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.

7. 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.

8. Shugailo O-i , Shugailo O-r, Ryzhov D. Strengtheing 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.

9. 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.

10. 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.

11. Шугайло О. П., Плачков Г. І., Гребенюк Ю. П., Шевченко І. А., Дибач О. М., Зелений О. В., Москалишин Р. І. Основні результати аналізу стану управління старінням атомних електростанцій в Україні // 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 // Прикладная механика. – 2019. 55. № 1 – С. 99 –108.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації (українською, англійською та російською), вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку

використаних джерел з 188 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 172 сторінки машинописного тексту, в тому числі, 62 рисунків, 17 таблиць, 1 додаток на 1 сторінці.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ І ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Загальні питання розвитку методів вирішення задач напружено–деформованого стану оболонкових конструкцій розглянуті в монографіях С.О.Амбарцумяна, В.А.Баженова, В.З.Власова, А.С.Вольміра, О.М.Гузя, В.І.Гуляєва, Я.М.Григоренка, В.Д.Кубенка, П.З.Лугового, Мейша, В.Г.Новожилова, Е.Рейснера, С.П.Тимошенка, О.Ю.Чиркова, A.K Noor, N.J. Pagano та інших.

Для розрахунку НДС теплообмінних трубок розглянуто теорію неоднорідних оболонок, теорію оболонок на пружній основі, теорію термопружності, викладення яких наведено в роботах В.П.Горбатиха, В.В.Гайдайчука, О.Я.Григоренка, І.М.Каденка, В.Г. Карнаухова, О.В. Єфімова, П.Л. Кирилова, І.В.Орінняка та інших. Побудова математичних розрахункових моделей для багатьох реальних тонкостінних елементів будівельних споруд і технологічного обладнання ґрунтується на сучасних теоріях пластин и оболонок, які залишаються грунтовною математичною базою для побудови скінчено–різницевих чисельних методів розрахунку реальних конструкцій.

1.1 Огляд попередніх робіт з визначення напружено-деформованого стану теплообмінних труб парогенератора для оцінки їх поведінки при аваріях

Забезпечення надійної роботи парогенераторів (ПГ) є найважливішим завданням для атомних електростанцій (АЕС) в усьому світі. При цьому бездоганна робота ПГ в рамках проектних допусків є однією із найважливіших складових для забезпечення безпеки на рівні, що вимагається чинними нормами, правилами та стандартами в ядерній енергетиці, економічної спроможності та надійності виробництва електроенергії.

У світі використовуються ПГ двох типів – горизонтальні та вертикальні. В Українській атомній енергетиці використовуються ПГ саме горизонтального типу. Досвід експлуатації показав, що горизонтальні ПГ мають ряд важливих переваг, як з

точки зору надійності, так і безпеки. Розглянута конструктивна концепція ПГ застосовуваних на АЕС з ВВЕР у порівнянні з вертикальними ПГ. Проведено аналіз впливу конструкцій ПГ на теплову ефективність та техніко-економічні показники, а також шляхи підвищення ефективності горизонтальних ПГ. Розглянуті питання обґрунтування вибору матеріалу трубчатки та можливості забезпечення її надійної роботи протягом проектного строку експлуатації та довгострокової експлуатації. Проаналізовано досвід експлуатації та показані шляхи вирішення проблем, що мають місце при експлуатації ПГ. У майбутньому експлуатаційні характеристики ПГ АЕС з ВВЕР можуть бути вдосконалені в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень з урахуванням результатів, отриманих в рамках цієї роботи. Описані напрямки розвитку конструкції на базі досвіду експлуатації. Показано, що основні конструктивні рішення горизонтальних ПГ можуть бути використані і для нових енергоблоків потужністю до 1600 МВт.

Для теоретичних розрахунків міцності та надійності ПГ при проектуванні і конструкуванні використовуються досить складні методи та методики. Слід відмітити, що використання недосконалих методик у подальшому може призводити до порушень в роботі і навіть до виникнення аварійних ситуацій, особливо це стосується ПГ АЕС. Проектування ПГ – надзвичайно складна і відповідальна задача, тому випадки недбалості при розробці їх конструкцій можуть обходитись надто дорого для персоналу та навколошнього природного середовища. Традиційно такі ПГ складаються з труб різних діаметрів і конфігурацій, які розраховуються з допомогою теорії пластин і оболонок [2-12]. Ці методики дозволяють отримати точний аналітичний розрахунок. Але слово «точний», насправді, доцільно взяти в лапки, тому що дані розрахунки виконувалися після проведення великої кількості спрощень і припущень. Так, досить часто у проектних розрахунках не враховується потоншення нетонких циліндричних оболонок (теплообмінних трубок (ТОТ)), відкладення, у т.ч шламові, що можуть виникати у процесі експлуатації на ТОТ ПГ, спрощено

моделюється, як факт попереднього напруження, і фізична нелінійність у поведінці циліндричних труб. Не кажучи вже про те, що багато особливостей геометрії ТОТ просто нехтуються: наприклад, вплив локальних прогинів, особливостей на нерівномірність розподілу напружень по оболонці і її товщині. Все це звичайно виправляється набором коефіцієнтів, за допомогою яких досягається певний консерватизм при розрахунку на міцність від експлуатаційних навантажень. В більшості випадків такий підхід може вважатись ніби то достатнім, але зволікання фактичними умовами експлуатації особливо при переході ПГ до довгострокової експлуатації може привести до негативних наслідків і порушень в роботі (аж до виникнення аварій). І ось тут на перший план виходить необхідність значно підвищити детальність і точність розрахунків (наприклад, двошарова оболонка для врахування наявності шламу, вплив шламу на трансформацію граничних умов, оцінка НДС при постуляції дефекту у вигляді тріщини, пітінгу, температурні напруження тощо), врахувати раніше відкинуті фактори, використати більш точні методи для виконання задачі, з якими можна вносить меншу кількість спрощень і ідеалізацій в конструкцію. Як наслідок – вимагається більш адекватна методика для врахування подібних ефектів.

В технічній літературі наведені різноманітні конструкції ПГ та їх математичні моделі [9-15], а також окремі конструкційні деталі ПГ [16-19], де в значній мірі приділена увага їх найбільш відповідальним елементам – колекторам. В роботі [20] експериментально вивчено вплив високотемпературної технології розширення води на руйнування між отворами для ТОТ, та термічної обробки отворів для ТОТ. Метою усіх цих досліджень було виявлення механізму пошкодження пристройів відповідальних за водопостачання колекторів.

Відома значна кількість літературних джерел по розрахунку конструкцій ПГ та їх елементів: загальна [21-25] і довідкова [26-29].

Слід відзначити, що в «Державному науково – технічному центрі з ядерної та радіаційної безпеки» значна увага приділяється дослідженню і розвитку сучасних міжнародних підходів та вимог до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної небезпеки енергоблоків АЕС для використання в процесі перегляду чинних в Україні норм та правил щодо сейсмостійкості енергоблоків АЕС [30-40]. Результати діяльності з оцінки сейсмостійкості ПГ також враховано в цих роботах, оскільки згідно з вимогами норм та правил, що діють в атомній енергетиці, міцність ПГ також оцінюється для комбінації навантажень «нормальні умови експлуатації+максимальний розрахунковий землетрус» (НУЕ+МРЗ).

При проектуванні та експлуатації ПГ особлива увага приділяється розробці матеріалів для виготовлення елементів ПГ, які при експлуатації ПГ знаходяться в агресивному хімічному середовищі, що зокрема спричинює ерозійно-корозійні пошкодження [41-52]. Це також відноситься и до ТОТ, оскільки вони повинні мати гарантію безаварійного використання до 30 років. В роботах [51, 52] наведені результати досліджень в'язкості руйнування сталей ВКУ (аналогічній сталі ТОТ) різних реакторів дозволяють стверджувати, що відміна від малолегованих і вуглецевих сталей, аустенітні нержавіючі сталі (зокрема 08Х18Н10Т) не проявляють різкого в'язко-крихкого переходу.

Робота ПГ може супроводжуватися змінним навантаженням, при яких в ТОТ відбуваються коливальні процеси, що може привести до аварійних ситуацій в ПГ. Тому існує значна кількість досліджень, які дають можливість дослідити коливання ТОТ і визначити їх небезпечні режими [53-58]. В роботі [53] на основі проведеного співставлення рівнянь динаміки зігнутих циліндричних трубок, отриманих з допомогою принципу Гамільтона і з допомогою традиційного Ньютонівського підходу, показана їх правомірність застосування для розв'язку подібних задач. У статтях [55, 56] досліджено вплив внутрішнього потоку рідини на коливання U – подібного трубопроводу. Розглянуті різні випадки граничних умов. Визначені

критерії виникнення невстановлених коливань, що самозбуджуються, флатерного типу. В роботі [57] проведені розрахунки чисельними методами коливань, що самозбуджуються, пружної циліндричної трубки з допомогою моделі зосереджених параметрів. Теоретично визначені області нестійкості системи з пружною циліндричною трубкою. Встановлено, що низькочастотні коливання завжди стійкі.

В статті [58] за допомогою принципу Гамільтона отримані рівняння коливань зігнутих дугою трубопроводів з нейтральною віссю, яка не розтягується. Трубопроводи проводять потік ідеальної нестисливої рідини.

При конструюванні ПГ детально досліджені задачі про нестійкість прямолінійного трубопроводу, який проводить однорідний потік рідини, що розглядались в роботах [59, 60].

Суміжні питання динаміки тонкостінних циліндричних трубок, які взаємодіють з внутрішньою неоднорідною рідиною розглянуті в роботах [61-64]. Підкреслимо, що при розв'язку цих задач основна увага приділялась питанням коливань і розповсюдженням пружних хвиль в стінках трубок без врахування їх випинання.

За роки експлуатації кожний ПГ, як частина третього бар'єру безпеки, сприяє численним навантаженням та приймає участь у перехідних режимах (пуск, зупинка, гідравлічні випробування тощо). Кількість таких режимів чітко обмежено регламентом безпечної експлуатації АЕС і їх перевищення не допускається, але приймаючи до уваги роботи з продовженням строку експлуатації АЕС України, у низці випадків виникає питання – «чи можна збільшити допустиму кількість регламентних циклів навантаження без зниження рівня безпеки і за умови дотримання критерію циклічної міцності?». В цьому випадку значну увагу приділено дослідженню питання про перепризначення допустимої кількості циклів навантаження тепломеханічного обладнання АЕС [65-71]. Дотримання критерію циклічної міцності це одно із найважливіших питань при визначені надійності ПГ є важливим фактором для безперебійної роботи АЕС. Це питання детально досліджено

в наступних роботах [72-76]. У статті [72] відзначається, що ПГ реакторних установок ВВЭР як третій фізичний бар'єр безпеки між радіоактивною та нерадіоактивною частиною АЕС експлуатуються в найбільш важких корозійних умовах. В даний час на АЕС України експлуатуються 52 горизонтальних ПГ (ПГВ-1000М), напрацювання яких складає від 10 000 до 130 000 годин. В процесі експлуатації ПГВ-1000М виявлялись різні випадки їх руйнування.

Досвід роботи парогенераторів з різними пучками труб проаналізовано у [74]. Показані шляхи вдосконалення конструкції. Наведено результати обчислювально – теоретичних досліджень. Ці дослідження, зокрема показують, що коридорне розташування трубного пучка є більш вигідним. В роботі [75] експериментально обґрунтована можливість тривалої роботи енергоблоку з реакторною установкою ВВЕР-1000 на потужності 1–5% номінальної шляхом оптимізації налаштувань регуляторів постачання ПГ, технологічного конденсатора і швидко діючої редукційної установки скиду пару у колектор (ШРУ-К) і зниження рівня термопульсацій у патрубку живильної води ПГ. Рекомендовані оптимальні для термонапруженого стану патрубків умови роботи системи живильної води в переходних і стаціонарних режимах. В статті [76] розроблені аналітичні і чисельні методи розв'язку задач про напружено – деформований і граничний стан трубопровідних систем, в тому числі при наявності в них дефектів. Досліджено опір трубних сталей руйнуванню в процесі довгострокової експлуатації. Розроблені методологія і програмне забезпечення для оцінки напружено-деформованого стану з метою подовження ресурсу діючих трубопроводів. Виконані розробки застосовані для підвищення надійності трубопровідних систем України.

Враховуючи загально державну програму розвитку атомної енергетики до 2035 року, важливим чинником безпечної та безперебійної роботи АЕС є ресурс тепломеханічного обладнання та трубопроводів [77-85] та можливість перепризначення ресурсу для забезпечення довгострокової експлуатації АЕС.

В роботі [84] показано, що в процесі експлуатації ПГ має місце зародження і наступний розвиток корозійних дефектів ТОТ ПГ. Порушення цілісності ТОТ ПГ призводить фактично до розгерметизації першого контуру реакторної установки. Виявлені особливості корозійного пошкодження ТОТ при різних режимах роботи ПГ, а також розроблений метод визначення технічного стану залишкового ресурсу трубного пучка ПГ.

Достатньо вивченим і забезпеченим обчислювальними засобами є питання дослідження теплогідравлічних переходних процесів при експлуатації АЕС [86- 93]. У дослідженні [87] розроблена методика діагностики в режимі он-лайн стану ПГ шляхом оцінки товщини стінки ТОТ у ПГ. Дуже важливо виявити невелику аномалію стінки ТОТ на ранній стадії. Метою даного дослідження є розробка методики діагностики в режимі он-лайнового стану парогенератора шляхом оцінки загального спостереження даних про загальний коефіцієнт теплопередачі, який є незаперечною важливою змінною у стані. Це дослідження наводить спрощені математичні моделі перегрівання і випарника для оцінки загального коефіцієнту теплопередачі.

Особливі результати в Україні і за кордоном досягнуті в розробці розрахункових кодів для теоретичного визначення теплогідравлічних параметрів в процесі експлуатації АЕС. У статті [90] представлена комп'ютерна програма для стаціонарного теплогідравлічного аналізу горизонтального парогенератора ПГВ–1000. Програма надає можливість аналізувати розподіл потоку та температури у першому контурі парогенератора ПГВ–1000, перепади тиску, теплообмін між першим та другим контуром та багатовимірний розподіл тепла. Особлива увага приділяється переходним процесам другого контуру. Код передбачає 3-Д розподіл порожньої фракції, перерозподіл маси під зануреним перфорованим листом і профіль рівня парогенератора. За допомогою розробленої комп'ютерної програми проведено детальне термогідравлічне дослідження ПГВ–1000. Проведено широкий діапазон розрахунків та отримано набір важливих характеристик парогенератора. В роботі [91]

представлені результати чисельного моделювання теплогідравлічної моделі реактору ВВЕР-1000. Моделювання проводилось з використанням інтегрованих програм ViSA (Visual System Analyzer) та RELAP5 (Програма аналізу реакторів та аналізу витоків реакторів, версія 5) [92], відомих як VISA_RELAP5. Спочатку був розроблений код RELAP5, який по суті є ядром, яке вирішує задачі теплогідравліки, а згодом – VISA (графічний інтерфейс користувача) для моделювання термічної гідравлічної системи реакторів з тиском типу (PWR), в яких проходять перехідні процеси. В статті [93] візуальне середовище для кодів системного аналізу (далі – "ViSA") було розроблено для підтримки кодів користувачів у їх підготовці введення, виконання коду та інтерпретації результатів.

Для розв'язку задач із визначення температурних напружень і переміщень існують фундаментальні роботи, зокрема така як [94]. У цій роботі викладені основи теорії, аналітичні методи, наведені великі довідкові дані, необхідні для практичного розрахунку надзвичайно широкого класу теплообмінної апаратури, включаючи кожухотрубчасті теплообмінники, теплообмінники з ребристими трубами, компактні пластинчато–ребристі теплообмінники, пластинчато-змієвикові теплообмінники, насадкові теплообмінники і конденсатори, градирні і космічні випромінювачі. Описано парогенератори і теплообмінники для рідких металів і розплавлених солей.

Для виконання технічних оцінок та наукових досліджень у галузі атомної енергетики у ДНТЦ ЯРБ використовуються різноманітні розрахункові коди, які за призначенням розподіляються на п'ять груп: 1. Теплогідравлічні процеси у реакторній установці та герметичному об'ємі: RELAP5, ATHLET, TRACE, ANSYS CFD, GRS-MIX, APROS Nuclear, MELCOR, ATHLET-CD, COCOSYS, LAVA. 2. Імовірнісний аналіз безпеки: SAPHIRE, RISKSPECTRUM PSA, RISKSPECTRUM WATCHER. 3. Розрахунки міцності: ANSYS Mechanical, ПК МІРАЖ (ЛІРА САПР), АСТРА-АЭС, WinPRAISE. 4. Нейтронно-фізичні процеси: DYN3D, SCALE, HELIOS, MCNP,

DOORS (DORT/TORT), TRANSURANUS, DERAB, RETINA-MADAM, NESSEL, SUSA. Аналіз радіаційних наслідків: InterRAS (RASCAL) тощо.

На сьогодні, визначення технічного стану інженерних конструкцій, виконується методами візуального і неруйнівного контролю з використанням переносних технічних засобів [79, 80, 95, 96]. Незважаючи на їх надійність, основним недоліком таких методів випробувань є те, що вони можуть бути виконані тільки в період планового обстеження, ремонту або заміни обладнання, яке експлуатується. Основним методом неруйнівного контролю ТОТ ПГ є вихрострумовий контроль (ВСК) [97] — один з методів контролю виробів для струмопровідних матеріалів. Започаткований на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, які наводяться в об'єкті контролю цим полем. Особливість ВСК в тому, що його можна проводити без контакту перетворювача і об'єкту. Їх взаємодія проходить на відстанях, достатніх для вільного руху перетворювача відносно об'єкту (від мікрон до декількох міліметрів). Тому цими методами можна отримувати гарні результати контролю навіть при високих швидкостях руху об'єкту.

Обмеженість методів неруйнівного контролю виявилася мотивацією для дослідників до створення альтернативних пристрій для оцінки технічного стану, механізмів або інженерних конструкцій в процесі їх експлуатації. В результаті досліджень, спочатку в галузі будування атомних електростанцій був розроблений метод оцінки поточного (неперервного) напружено-деформованого стану конструкцій [98]. Тому поряд з неруйнівними методами контролю стала застосовуватися неперервна діагностика технічного стану конструкцій, з використанням автоматизованих систем моніторингу. За кордоном їх називають системами моніторингу здоров'я конструкцій «Structural Health Monitoring – SHM». В атомній енергетиці ці системи називаються «On-Line Monitoring» [99], що можна перевести як неперервний моніторинг. У сфері атомної енергетики проводяться

роботи зі зниження витрат на виробництво електроенергії шляхом прийняття стратегій технічного обслуговування за поточним станом обладнання та автоматизації випробувань. Ці роботи викликали великий інтерес до технологій оперативного контролю та нових методів діагностування та прогнозування для виявлення і вирішення проблем, пов'язаних з устаткуванням і технологічними процесами, а також забезпечення безпеки, ефективності та стійкості до аварій. У статті наводяться приклади технологій, заснованих на ряді ключових напрямків застосування оперативного контролю: виявлення блокування вимірювальних ліній, тестування часу відклику датчиків тиску, контроль калібрування перетворювачів тиску, взаємне калібрування температурних датчиків на місці, оцінка стану обладнання та виконання профілактичного обслуговування внутрішньокорпусних пристрійв реактора.

Основні сучасні вимоги до систем моніторингу, регламентуються забезпеченням систем якості (ISO) на атомних електростанціях [100]. Вони постійно розвиваються і вимагають удосконалення. Однак для їхнього вдосконалення необхідне чітке розуміння всіх процесів, що відбуваються на АЕС: як організаційних, так і технологічних. Основне призначення ISO полягає у виявленні зародження дефектів і ушкоджень у матеріалах різних конструкцій. ISO мають наступні переваги:

1. На відміну від неруйнівних методів контролю вони працюють безперервно і дозволяють контролювати параметри технічного стану конструкцій в режимі реального часу.
2. ISO володіють здатністю неперервно або з заданим інтервалом часу, діагностувати місця виникнення дефектів у вигляді зароджених мікротріщини, деструкції матеріалу і оцінювати залишковий ресурс конструкцій.
3. Застосування ISO дозволяє призначати плановий ремонт конструкцій не по графіку, а по їх фактичному технічному стані, що збільшує міжремонтні терміни і скорочує витрати при їх експлуатації.
4. Застосування ISO підвищує безпеку виробництва, так як вони неперервно оцінюють технічний стан конструкцій і у випадку перевищення діагностованих параметрів подають повідомлення на робоче місце оператора.

Важливим фактором є те, що ПГ є бар'єром між першим радіоактивним контуром і водно – паровим середовищем, що має контакт із навколошнім простором, у зв'язку з чим цей бар'єр повинен бути надійним (щільним та герметичним). Щоб краще представити собі, що відбувається всередині ПГ, слід порівняти кілька цифр. В нього вливається півтори тисячі тон води в годину, а виливається в двісті разів менше. Все решта виходить у вигляді пару. У цих умовах ПГ перетворюється в справжню корозійну машину, де всі забруднення – шлами утворюються і концентруються. При цьому виникають проблеми – як їх звідти видалити, і як вони впливають на механічні процеси, що відбуваються в ПГ.

Окремі аспекти процесів, які передують утворенню шламів розглянуті в роботах [101, 102]. Утворення шламів безпосередньо на ТОТ досліджено в статтях [103-111]. В роботах [103-105] запропоновано метод прогнозування накопичення шламу на теплообмінних поверхнях ПГВ – 1000М і досліджені процеси “хайд-аут” (місцевого концентрування) домішок котлової води ПГ АЕС і їх вплив на надійність роботи обладнання. В роботах [106, 108] розглянуто механізм корозійного пошкодження ТОТ ПГ та вплив складу, товщини та кількості шламів на ризик пошкодження трубопроводів ПГ. В статті [107] вивчаються шлами корозійних продуктів у змієвиках з U – подібних ТОТ в ПГ АЕС, які можуть привести до забруднення ТОТ. Забруднення ТОТ – це відкладення шламу, які впливають на теплообмін між першим та другим контуром. Це може привести до зниження тиску пари і зменшення потужності. У статті [107] наведена методологія для моделювання впливу забруднення ТОТ на характеристики ПГ. Моделювання виконано з допомогою ThermoHYdraulique des Composants, який використовується компанією «Electricité de France» для тривимірного (3D) моделювання теплових гідравлічних потоків в ПГ. Забруднення ТОТ ініціює додатковий тепловий опір на ТОТ. Передбачається, що цей опір відповідає моделі Максвела для суцільної твердої фази з включеннями. Оскільки товщина шламу нерівномірно розподілена по трубному пучку, досліджено декілька

розділів теплового опору. В більшості випадків найбільш важливим фактором являється забруднення ТОТ, яке концентрується в закріпленні ТОТ. Ця серія моделювання є початковим етапом. Обговорюється стратегія вдосконалення моделі термоопору. В зазначених вище роботах основна увага приділяється визначеню областей забруднення ТОТ шламом і додатковий тепловий опір на ТОТ, але не визначається вплив шламу на НДС ТОТ і трансформацію граничних умов закріплення ТОТ. В статті [109] результати досліджень носять узагальнюючий характер визначення розташування шламів і можуть бути використані на моделях ПГ і визначені утворення шламів в ПГ, при їх експлуатації. В роботі [110] отримані аналітичні залежності для оцінки зміни розподілу температури і теплового потоку вздовж парогенеруючої труби і зниження потужності ПГ внаслідок утворення і накопичення шламу.

Для вдосконалення розрахунків ТОТ ПГ розроблені атласи дефектів, які визначають характер і розташування пошкоджень ТОТ різного характеру [111, 112].

Парогенератор ПГВ-1000М призначений для виготовлення насиченого пару в складі енергоблоку з водо-водяним енергетичним реактором і є складовою частиною циркуляційних петель реакторної установки. Від надійності ПГ в значній мірі залежать економічні показники роботи енергоблоку в цілому. Вартість простою енергоблоку, зокрема у випадку порушення в роботі ПГ може сягати більш ніж 300 тис. доларів на добу. Тому проблема безпеки та зменшення ризиків аварій при експлуатації ПГ АЕС є однією з найбільш актуальних і стає все більш важливою з часом, тим більше, що енергоблоки переходят до довгострокової експлуатації (більшою за визначений у проекті термін). Okрім цього існують і продовжують удосконалуватись методи управління можливими аваріями, що дасть змогу, якщо зовсім не уникнути зупинки блоку через ПГ, то принаймні мінімізувати період зупинки. Так у аварійних випадках, пов'язаних з втратою тепловідводу другого контуру необхідним є відновлення подачі води до ПГ, в тому ж числі і після суттєвого

зниження рівня води в ньому. В даних аварійних умовах поверхня теплообміну з боку другого контуру може бути частково або зовсім оголена.

В роботах [112, 113] досліджується вплив несуцільності ТОТ від пітінгів, які моделюються еліптичними дефектами. Вплив розмірів цих дефектів на несучу здатність ТОТ визначається за допомогою вагових функцій. Обговорюється можливість керування аварією при збільшенні несуцільностей до критичного стану. В статті [114] розглядаються дві конструкції ПГ: вертикальні та горизонтальні. Проблеми, пов'язані з ПГ на АЕС це - проколювання труб, зношування, розрідження, корозія, коливання, викликані потоком, розтріскування та деформація згину трубки або опорних пластин, переломи. Розглянуто випадки течії із першого контуру в другий. Періодичні перевірки ПГ показали локалізовані корозійні та механічні проблеми зносу на деяких ТОТ та їх деградацію у часі.

В доповіді [115] відзначається, що ТОТ ПГ є важливою частиною границі першого контуру і для того, щоб виконувати функції ефективного бар'єру ТОТ не повинні мати великих або наскрізних дефектів. Забезпечення надійної роботи ТОТ ПГ є надважливою задачею для АЕС різного типу у всьому світі. Через руйнування ТОТ, до завершення проектного ресурсу, замінені або виведені із експлуатації практично всі ПГ першого покоління з із теплообмінними трубами із сплаву 600МА. На ПГ російського виробництва проблема також виникає, але руйнування трубок теплообмінного пучка трапляється майже на всіх блоках АЕС. Для запобігання руйнування трубок виконується вихрострумовий контроль теплообмінної поверхні, за результатами якого виявляються трубки із дефектами, що можуть стати наскрізними у найближчому часі. За результатами ВСК виконується глушіння трубок із дефектами. Кількість ТОТ, що заглушені не має перевищувати 2% від загальної кількості ТОТ, і це значення є одним із основних, що визначає залишковий ресурс ПГ.

У статті [116] на основі аналізу впливу ерозійно-корозійного зносу трубопроводів управління їх ресурсом проведено з допомогою відповідних

програмних засобів (ПЗ). Розглянуто переваги, які дають ПЗ для управління ресурсом і планування ремонту. Зазначено деякі проблеми, що виникають при використанні ПЗ для аналізу результатів ультразвукової товщинометрії. Намічені шляхи вдосконалення алгоритму керування ресурсом трубопроводів для обґрунтованого переходу для реалізації концепції ремонту трубопроводу за технічним станом. В роботі [117] представлена - принципова теплова схема, особливості функціонування і математична модель горизонтального ПГ типу ПГВ-1000, що є частиною основного обладнання двоконтурних АЕС з ВВЕР-1000. Розроблена модель ПГ реалізована у вигляді комп’ютерної програми і може розглядатися як компонент автоматизованих програмних комплексів в складі АСУ ТП енергоблоків АЕС з ВВЕР – 1000. Розглянута структура блоків програми розрахунку параметрів технологічних процесів в ПГ типу ПГВ – 1000.

Існує декілька робіт про визначення причин, які можуть бути попередниками виникнення аварій. Так в статті [118] аналізується процес забруднення шламом пластини, яка підтримує пучок ТОТ і на самих U – подібних ТОТ в двох основних районах. Шлам може знизити ефективність охолодження і вплинути на його динамічну поведінку, що може привести до аварії. Методи, засновані на локальних перевірках ПГ, були розроблені раніше і вже використовуються. Вони проводять оцінку місцевого коефіцієнту забруднення шламом під час виключення ПГ. Розроблений новий метод теоретичної оцінки коефіцієнта забруднення шламом пластин, які підтримують пучки ТОТ і на самих U – подібних ТОТ без виключення ПГ. Цей метод заснований на 1D фізичній моделі ПГ, яка відтворює складну динаміку двофазних явищ потоку в середині ПГ.

Подача холодної води в ПГ у випадку виникнення аварійної ситуації може привести до появи суттєвих термічних напружень на ТОТ ПГ. Тут виникає питання оцінки цілісності ТОТ в аварійних умовах. Регулювання подачі холодної води в ПГ – одна з найважливіших стратегій керування аваріями, тому необхідно дослідити вплив

факторів, які впливають при цьому на цілісність ТОТ і визначити вибір стратегії подолання аварійних наслідків. Попередні дослідження резервного підживлення ПГ АЕС в умовах електrozнеструмлення енергоблоку проведені в роботі [90], де представлено оригінальне технічне рішення з використання енергії пари для організації підживлення парогенераторів АЕС в умовах повного електrozнеструмлення. Виконано аналіз застосування композиційної конструкції трубопроводу насосного агрегату, показано її технологічну доцільність і можливість бути реалізованою.

У статті [118] представлено результати оцінки цілісності ТОТ з урахуванням їх поточного технічного стану в умовах аварії з осушенням ПГ, що має суттєве значення у продовженні терміну експлуатації ПГ і вдосконаленні стратегій управління аваріями.

Значні результати отримані при дослідженні впливу локального потоншення циліндричних трубок на їх НДС [120-124]. Ці результати будуть використані при розробці і вдосконаленні стратегій управління аваріями.

Тихоокеанською Північно–Західною Лабораторією для Комісії ядерного регулювання (КЯР) США розроблено програму цілісності ПГ [125]. Основна мета програми полягала в тому, щоб забезпечити КЯР США перевіrenoю інформацією про достовірність методів неруйнівного контролю для виявлення недоліків у трубчастих елементах парогенератора та визначення залишкової товщини стінки для оцінки цілісності трубчастки. Ця інформація була використана для визначення частоти, обсягу та порядку проведення робіт з технічного обслуговування ПГ та визначення граничних рівнів деградації ТОТ.

В роботі [126] представлена фізично й статистично обґрунтовані пропозиції до впровадження ризик-орієнтованого підходу до оцінки цілісності ТОТ ПГ, що базується на ймовірнісному законі розподілу розмірів дефектів з урахуванням їх зростання, моделі в'язкого руйнування труби з дефектом та статистики глушіння ТОТ.

Виходячи з історії глушіння ТОТ кожного ПГ, визначаються три статистичні параметри: початкова кількість, початковий розмір і швидкість зростання дефектів. Розроблений метод використовувався для прогнозування кількості руйнувань/протікань ТОТ, а також для оцінки зниження тиску гідравлічних випробувань першого контуру АЕС України. У документі [126] визначений єдиний порядок оцінки експлуатаційних характеристик компонентів та трубопроводів АЕС з ВВЕР.

В статті [128] на підставі аналітичної моделі для граничного пластичного стану, розроблена чисельна процедура оцінки складного дефекту. Порівняння розрахункових результатів, отриманих за запропонованою процедурою, з експериментальними даними та результатами розрахунків отриманих іншими методами, показали її ефективність.

В статті [128] говориться, що в даний час жодна стандартна процедура тестування не дозволяє гарантувати точне кількісне визначення осьової стійкості тріщин ТОТ через їх незвичайну геометрію. В даній роботі оцінку цілісності ТОТ визначають за допомогою нового методу, який називається тестом на розтягування навантаження на петлі. Передбачається виведення різних геометричних функцій, необхідних для розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень та інтегралу J. Розраховується крива J-R для осьової тріщини ТОТ з сплаву, що використовується на АЕС з реакторами з підвищеним тиском води з сплаву Ni-Cr-Fe. Також характеристика поверхні тріщини методом фрактографії проводиться для прогнозування відповідного механізму крекінгу.

В роботі [129] розроблені методи і підходи до створення імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 для рішення завдань аналізу, діагностики і оптимального управління.

В статті [130] представлений проект сценаріїв розриву колектору ПГ, який був виконаний у 5-ій рамковій програмі ЄС в галузі ядерної безпеки протягом 2000-2002

років. Однією метою проекту було створення повної бази даних на утриманні продукту поділу на ПГ. Друга мета полягала у перевірці та розробці передбачуваних моделей для підтримки втручання в аварійне управління в ланцюгах розриву колектору ПГ, які або безпосередньо призводять до серйозних аварій, або індуковані іншими послідовностями, що призводять до серйозних аварій. Моделі, розроблені для зберігання продуктів поділу повинні були бути включені в важкі коди аварій. Крім того, було показано, що існуючі моделі для турбулентного осадження, тобто домінуючий механізм осадження в сухих умовах і при високих витратах, містять велику невизначеність. Результати проекту можуть застосовуватися до різних реакторів під тиском, включаючи горизонтальні ПГ.

В роботі [132] розроблені математичні моделі систем управління парогенератором енергоблоку АЕС.

В статті [132] розроблені методи оцінки залишкової міцності ТОТ з недоліками, які базуються на статичному законі граничного навантаження в теорії пластичності. Проводилися серії повномасштабних випробувань до відмови елементів трубопроводу від поверхні різання. Процедура, узгоджена з проектними нормами, була запропонована Українським АЕС для визначення допустимої товщини стінки елементів трубопроводу з вуглецевих сталей, пошкоджених ерозійно-корозійним зносом.

В роботі [133] розроблена процедура визначення товщини стінок трубопроводів АЕС при еrozійно-корозійному зношуванні матеріалу.

У статті [135] наводяться приклади технологій, заснованих на ряді ключових напрямів застосування оперативного експлуатаційного контролю: виявлення блокування вимірювальних ліній, тестування часу відклику датчиків тиску, контроль калібрування перетворювачів тиску, взаємне калібрування температурних датчиків на місці, оцінка стану обладнання та виконання профілактичного обслуговування внутрішньокорпусних пристройів реактора. У звіті [136] представлено результати

оцінки цілісності ТОТ ПГ енергоблоку №3 Рівненської АЕС в умовах аварії, у випадку підживленні висушеного ПГ з врахуванням поточного технічного стану ПГ енергоблоку №3 РАЕС, термін експлуатації яких наближається до вичерпання проектного ресурсу, що виконано вперше.

В роботі [137] проаналізовані результати досліджень експлуатаційних дефектів в ТОТ ПГ ВВЕР, а також розглянуті особливості пошкоджень теплообмінників і зварних з'єднань колекторів з патрубками корпусу ПГ. Встановлені причини деградації матеріалів другого контуру АЕС.

З приведеного огляду літературних джерел витікає, що на поточний час основну увагу всіх розглянутих досліджень зосереджено на встановленні характеру та розмірів дефектів та їх впливу на поведінку ТОТ, складено також, так званий атлас дефектів і станів забруднення ТОТ шламом. Певну увагу також приділено поведінці ТОТ при додатковому тепловому опорі, але не досліджено саме вплив шламу на закріплення і відповідно НДС ТОТ. Тому, цю дисертаційну роботу присвячено дослідженню впливу скупчення шламу на граничні умови закріплення ТОТ ПГ та їх НДС із наступним визначенням спроможності теплообмінних трубок зберігати свою цілісність в умовах аварій з урахуванням їх поточного технічного стану. Розглянуто також різні варіанти виникнення аварій, які спричинені окремими чинниками.

1.2 Важливість результатів роботи з погляду визначення стратегії управління аваріями

Результати цієї роботи важливі з точки зору визначення стратегії і прийняття обґрунтованих рішень для управління аваріями, які пов'язані з підживленням ПГ в умовах його осушення при виникненні важких аварій.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що запропоновано розв'язання нових практичних задач поведінки оболонки складної геометрії з низкою нерегулярностей, яка знаходитьться під впливом шару шламу при нестационарних

термічних навантаженнях, а також адаптовані методи(методики), скінчено-елементні алгоритми та програми численного розв'язку задач.

Практична цінність отриманих у роботі результатів полягає в тому, що розроблені розрахункові моделі та алгоритми для використання програмного забезпечення “ANSYS” можуть бути застосовані (з незначними коригуваннями за необхідністю) для дослідження поведінки та оцінки цілісності всіх елементів ПГ для різних умов та аварійних ситуацій.

Отримані результати важливі з точки зору розробки стратегії керування аваріями, пов'язаними з підживленням ПГ в умовах його осушення при виникненні важких аварій. Ці результати вже використовуються Українською аналітичною групою при оцінці поточних умов експлуатації ПГ енергоблоку №3 РАЕС і визначені поведінки ТОТ в умовах підживлення порожнього ПГ.

На захист виносяться наступні положення і результати:

- комплекс методик і розрахункових кодів для моделювання термомеханічних процесів в ТОТ при жорсткому термомеханічному навантаженні (аварійна ситуація).

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.

Висновки і постановка задачі

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 ТОТ, складено

також, так званий атлас дефектів і станів забруднення ТОТ шламом. Певну увагу також приділено поведінці ТОТ при додатковому тепловому опорі, але не досліджено саме вплив шару шламу на закріплення і відповідно НДС ТОТ. Тому, цю дисертаційну роботу присвячено дослідженю впливу скучення шару шламу на граничні і кінематичні умови закріплення ТОТ ПГ та їх НДС 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 ПГ АЕС через визначення механізму пошкоджень в ТОТ, шляхів їх запобігання, а також керування термомеханічними процесами при аварійних ситуаціях

Ця робота є актуальною з погляду формування стратегії керуванням аваріями, які пов’язані з підживленням ПГ в умовах його осушення при виникненні важких аварій з урахуванням поточного технічного стану трубчатки ПГ.

Метою роботи є поглиблений аналіз НДС та оцінка цілісності ТОТ ПГ в умовах відкладення шару шламу та значного термосилового навантаження для прийняття обґрунтованого рішення при організації підживлення парогенераторів АЕС в умовах повного електрозестримлення АЕС. Робота спрямована на підвищення рівня безпеки АЕС за рахунок удосконалення процедур керування аварією.

Для досягнення зазначененої мети розв’язуються 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 напруженодеформованого стану ТОТ з урахуванням впливу шару шламового відкладення для подальшої можливості формування удосконаленого алгоритму керування аварією в умовах повного електрознеструмлення ПГ.

В роботі виконано узагальнення результатів досліджень аналізу НДС трубчатих елементів ПГ із низкою нерегулярностей геометрії при значному термосиловому навантаженні.

РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ПОТОНШЕНЬ ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ НА ЇХ НДС

2.1. Вплив локальних потоншень трубчатих елементів парогенераторів і трубопроводів ядерних установок на їх НДС

Трубопроводи ПГ і ЯУ в цілому являють собою складні просторові конструкції, які в процесі експлуатації піддаються інтенсивним механічним, температурним, хімічним та іншим впливам – як при базових режимах роботи реактора, так і при перехідних процесах (маневрування потужністю, пуски і зупинки реакторної установки (РУ), підключення і відключення окремих петель головного циркуляційного контуру (ГЦК) тощо). Частково, пульсації внутрішнього середовища і динамічні навантаження від неврівноважених обертань роторів насосів і інших агрегатів породжують постійні вібрації трубопроводів, а періодичні пуски і зупинки РУ обумовлюють циклічний характер напружень в металі. Зважені абразивні частинки, які утворюються при роботі тепломеханічного обладнання переносяться рідиною, і впливаючи на внутрішню і зовнішню поверхню трубопроводів, сприяють передчасному зношенню їх поверхонь.

Через складні умови експлуатації в елементах трубопроводів утворюються різноманітні дефекти. Однією з основних причин утворення дефектів і передчасного зносу внутрішніх поверхонь трубопроводів які, транспортують робоче середовище в умовах робочого тиску і значних позитивних температур, є одночасна дія механічних (ерозія) і електрохімічних (корозія) процесів, які призводять до потоншення стінок трубопроводу. Результати дослідження стану металу трубопроводів вказують на те, що швидкість потоншення стінок трубопровідної арматури в зонах ерозійно-корозійного пошкодження (ЕКП) з впливом часу, як правило, збільшується і помітно перевищує значення, які прийняті при призначенні проектного терміну служби трубопроводів. Це пояснюється тим, що еrozія, корозія, місцева мікротурбулентність середовища в околиці дефектів і концентрація напружень в металі, стимулюють одне

одного, сприяють збільшенню числа мікропошкоджень матеріалу, більш інтенсивному відриву частинок металу, її активному вимиванню і, як правило, подальшому розвитку локальних потоншень [159].

Такі прогресуючі в часі ЕКП в кінцевому рахунку можуть привести до обмеженої працездатності трубопроводу, скоротити термін його експлуатації і вимагати проведення досить дорогих ремонтно-відновлювальних робіт. У зв'язку з цим, актуальною задачею є розробка обґрунтованих методик, які дозволяють оцінити гранично допустиме потоншення стінок і відповідно міцності трубопроводів з ЕКП, а також спрогнозувати працездатність трубопроводу протягом заданого періоду експлуатації, в тому числі довгострокової експлуатації.

Забезпечення надійної роботи трубопроводів протягом усього строку експлуатації пов'язано перш за все із збереженням їх працездатності та цілісності за експлуатаційними режимами (навантаженнями) та суттєво залежить від точності методів розрахунку на міцність, які дозволяють врахувати місцеве потоншення стінок трубопроводів.

Для достовірної оцінки міцності ділянки трубопроводу з локальними потоншеннями стінки необхідно визначити таку геометричну і математичну модель потоншення, яка надає можливість адекватно відобразити форму реального дефекту.

Досвід експлуатації вказує на те, що ЕКП, як правило, розвиваються на вже існуючих дефектах металу, які утворилися при виготовленні елементів трубопроводу в заводських умовах, при монтажі елементів в складі РУ і ПГ, протягом ремонтно-відновлювальних робіт в процесі експлуатації тощо. Найбільш розповсюдженими зонами ЕКП (потоншеннями) стінок трубопроводів є такі:

- ділянки за регулюючими клапанами і дросельними пристроями;
- ділянки зі зміною напрямів і/або швидкості потоку (теплообмінні труби, відводи, трійники, переходи тощо);
- ділянки із ступінчастими (або близькими до ступінчастих) змінами геометрії внутрішньої поверхні (неспіввісні з'єднання паропроводів, підкладні кільця, грубі

зварні шви тощо);

- проточна частина арматури.

Дефекти, які утворилися (потоншення) в більшості випадків мають форму близьку до еліпсу в плані і схожу до пів еліпсу або параболи по товщині стінки, рідше спостерігаються дефекти в формі полоси (полос).

Вказані вище дефекти трубопроводів можуть привести до порушення цілісності трубопроводів і як наслідок до аварійної ситуації, зокрема для ПГ, якщо мова йде про трубопроводи живильної води, тому дослідження їх впливу на працездатність тепломеханічного обладнання РУ є актуальною задачею.

2.1.1 Регулюючі вимоги до експлуатації трубопроводів з ЕКП і існуючі підходи до визначення граничного потоншення

НДС, міцність і працездатність фрагменту трубопроводу з ерозійно-корозійними пошкодженнями в значній мірі залежать від геометричних параметрів дефектів – розміру в плані, орієнтації, глибини і форми поверхні розмиву.

В той же час різні нормативні документи (НД) для зазначених випадків обмежуються оглядом лише одного геометричного параметру – потоншення стінки трубопроводу. НД регламентують різні граничні значення потоншення – від 5 до 20 % вихідної товщини стінки – при досягненні якої фрагмент трубопроводу підлягає заміні, а саме:

- згідно з інструкціями [160, 161] потоншення стінки не повинно виходити за границі допуску найменших значень розрахункової товщини стінок - 5%;
- методичні вказівки [162] допускають пониження товщини стінки на 15% від найменшого значення незалежно від розмірів дефекту;
- протиаварійні циркуляри і приписи [163-166] рекомендують проводити заміну дефектної ділянки трубопроводу при зменшенні товщини стінки на 20% від вихідного значення.

При цьому ні один з казаних НД не передбачає дослідження НДС і міцності пошкодженої ділянки трубопроводу. Такий загальний підхід не зовсім обґрунтований

і може призвести як до продовження експлуатації трубопроводу з недостатнім запасом міцності, так і до необов'язкової заміни ділянки трубопроводу.

В Інституті електрозварювання ім. О.Є.Патона був розроблений проект нормативного документу з оцінки міцності і ресурсу трубопроводів та арматури з ерозійно-корозійним зносом для АЕС [167]. В ньому запропонована аналітична методика оцінки міцності і ресурсу ділянок трубопроводів з потоншеннями (прямолінійних ділянок, колін, конічних переходів і трійників). Методика оцінки міцності трубопроводів з ЕКП започаткована на визначені граничної межі площин місцевого потоншення стінки, що є консервативним. Окрім цього, вказана методика також не розглядає і не враховує НДС конструкції в зонах потоншень.

Таким чином, обґрунтовано можна стверджувати, що задача достовірної оцінки міцності і працездатності фрагментів трубопроводів з ЕКП на основі аналізу НДС конструкції в зоні дефекту (потоншення) на сьогоднішній день все ще остаточно не вирішено. Для підтвердження теоретичних розрахунків був розроблений зразок для дослідження НДС трубопроводів з локальними потоншеннями [168].

2.1.2 Запропоновані підходи до вирішення проблеми

Для достовірної оцінки міцності і працездатності фрагментів трубопроводів з ЕКП пропонується використати методологію і програмне забезпечення (ПЗ), яке реалізує наступні етапи аналізу:

- 1) визначення геометричних параметрів ЕКП при періодичному контролі металу трубопроводів;
- 2) занесення геометричних параметрів, а також інших відомостей про фрагмент трубопроводу та ЕКП в базу даних;
- 3) побудова прогнозних кривих росту ЕКП;
- 4) математичне моделювання геометрії дефектів: розмірів в плані, орієнтації головних вісей, глибини і форми поверхні розмиву тощо;
- 5) розрахунок методом скінчених елементів (МСЕ) всього трубопроводу або достатньо довгої його частини, включаючи фрагменти з розглядуваними дефектами

(с допомогою ПЗ АСТРА-АЭС);

6) уточнений МСЕ-розрахунок фрагментів трубопроводів з дефектами і аналіз НДС металу в зонах ЕКП (за допомогою ПЗ ДИПРОС та/або ANSYS);

7) оцінка можливості руйнування фрагментів і можливості подальшої експлуатації (необхідності ремонту) трубопроводу з ЕКП.

Реалізація 2-ого і 4-ого кроків розробленої методології пов'язана з підготовкою вихідної інформації для подальшого використання.

Вище зазначалось, що для розрахункових досліджень трубопроводів з ЕКП застосовані наступні програмні засоби:

- програмний комплекс АСТРА-АЭС [171], призначений для автоматизованих розрахунків просторових розгалужених трубопровідних систем на статичну і циклічну міцність, сейсмічні впливи, віброміцність і невстановлені динамічні процеси у відповідності з вимогами «Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» [153];

- дослідницький програмний комплекс ДИПРОС, призначений для МСЕ-розрахунку НДС пластинчато-оболонкових конструкцій і систем методом скінченних елементів [169];

- програмний комплекс ANSYS, який є універсальним програмним засобом, що вирішує складні інженерні задачі методом скінченних елементів. Динамічно розвивається протягом останніх 30 років і є широко застосовним засобом у сфері автоматизованих інженерних розрахунків для вирішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла, задач механіки рідини і газу [170].

Комбінація вказаних ПЗ дозволяє:

- за допомогою ПЗ АСТРА-АЭС по стрижневій схемі дослідити весь трубопровід (або достатньо довгу його частину) і визначити напруження, переміщення, моменти і зусилля на границях фрагменту з ЕКП;

- за допомогою ПЗ ДИПРОС та/або ANSYS детально дослідити НДС фрагменту трубопроводу з ЕКП.

На першому етапі досліджень застосовано програмні засоби АСТРА-АЭС та ДИПРОС, у подальшому використання ДИПРОС замінено більш сучасним програмним засобом ANSYS.

2.1.3 Виконання розрахунків з визначення консервативної форми моделювання дефекту

Однією з основних необхідних умов визначення можливості застосування будь-якого програмного засобу у розрахункових обґрунтуваннях безпеки АЕС є вірогідність отриманих результатів.

З метою підтвердження можливості використання ПЗ ДИПРОС для дослідження НДС фрагментів трубопроводів з ЕКП були проведені тест-розрахунки і виконано порівняння отриманих результатів з аналітичними рішеннями і даними експериментальних досліджень.

Нижче викладені результати моделювання поверхні реального дефекту та визначення найбільш консервативної поверхні (з погляду напружень, які виникають) для її подальшого використання для оцінки міцності і працездатності фрагментів трубопроводів з локальними потоншеннями стінок.

Розроблена модель дефекту-потоншення поверхнями еліпсоїду, еліптичного параболоїду та еліптичного конусу. Проведено визначення найбільш консервативної поверхні (з погляду напружень, які виникають) для її подальшого використання при проведенні оцінки міцності і працездатності трубопроводів з локальними потоншеннями стінок.

Задача оцінки впливу моделі дефекту на напружений стан конструкції вирішувалась за допомогою чисельних методів із застосуванням програмного коду ДИПРОС [169].

При моделюванні дефектів-потоншень застосовані наступні основні принципи:

- Площа дефекту F дорівнює площині еліпсу F^{el} :

$$F = F^{el}, \quad (2.1)$$

де F – площа плями дефекту, F^{el} – площа еліпсу.

б) Головні осі еліпсу u^{el}, v^{el} збігаються з головними осями плями дефекту

u, v ;

в) Співвідношення головних моментів інерції J_u, J_v дефекту дорівнює співвідношенню головних моментів інерції еліпсу J_u^{el}, J_v^{el} :

$$\frac{J_u}{J_v} = \frac{J_u^{el}}{J_v^{el}}, \quad (2.2)$$

г) Поверхня потоншення моделюється поверхнею еліпсоїда, еліптичного параболоїда та еліптичного конуса в залежності від реальної поверхні. Головна вісь поверхні проходить через центр еліпсу в основі і перпендикулярна його площині;

д) Об'єм порожнини, що моделюється, повинен максимально відповідати об'єму реального потоншення.

На підставі співвідношень (2.1), (2.2) визначаються геометричні розміри еліпсу, який відтворює дефект і кут повороту осей еліпсу щодо обраної системи координат.

Для моделювання дефектів-потоншень використано алгоритм, який побудовано на основі загальних співвідношень для обчислювання геометричних характеристик перетинів, викладених в роботах [120-123].

1. На пляму дефекту накладається сіткова область з елементами $M(i, j)$, де M – елемент сіткової області, i та j – індекси, які вказують на місцезнаходження елементу в сітковій області;

2. Визначаються геометричні характеристики дефекту:

- Площа F

$$F = ab \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M(i, j), \quad (2.3)$$

де a і b – лінійні розміри елементу сіткової області M , n та m – індекси, що приймають значення 1 або 0 в залежності від того чи належить центр ваги (ЦВ) елементу сіткової області до плями дефекту (належить - 1, не належить - 0);

- Статичний момент інерції S_x відносно осі ox

$$S_x = ab \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M(i, j) \times b(i - 0.5) = ab^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M(i, j) \times (i - 0.5); \quad (2.4)$$

- Статичний момент інерції S_y відносно осі oy

$$S_y = a^2 b \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M(i, j) \times (j - 0.5); \quad (2.5)$$

- Координати центру ваги x_c, y_c

$$x_c = \frac{S_y}{F}, \quad y_c = \frac{S_x}{F}; \quad (2.6)$$

- Момент інерції J_{x_1} відносно центральної осі ox_1

$$J_{x_1} = ab \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M(i, j) \times [b(j - 0.5) - y_c]^2; \quad (2.7)$$

- Момент інерції J_{y_1} відносно центральної осі oy_1

$$J_{y_1} = ab \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M(i, j) \times [a(i - 0.5) - x_c]^2; \quad (2.8)$$

- Відцентровий момент інерції $J_{x_1 y_1}$

$$J_{x_1 y_1} = ab \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M(i, j) \times [a(i - 0.5) - x_c] \times [b(j - 0.5) - y_c]; \quad (2.9)$$

- Кут повороту головних осей інерції α_0

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{J_{x_1 y_1}}{J_{y_1} - J_{x_1}}; \quad (2.10)$$

- Головний момент інерції J_u відносно осі ou

$$J_u = \frac{1}{2} \left[(J_{x_1} + J_{y_1}) \pm \sqrt{(J_{x_1} - J_{y_1})^2 + 4J_{x_1 y_1}^2} \right]; \quad (2.11)$$

- Головний момент інерції J_v відносно осі ov

$$J_v = \frac{1}{2} \left[(J_{x_1} + J_{y_1}) \mp \sqrt{(J_{x_1} - J_{y_1})^2 + 4J_{x_1 y_1}^2} \right]; \quad (2.12)$$

правило знаків: при $J_x > J_y$ - верхній знак, при $J_x < J_y$ - нижній.

3. Визначаються геометричні характеристики еліпсу:

- довжина напівосі еліпса a^* і b^* :

$$a^* = \sqrt{\frac{F}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{J_u}{J_v}}, \quad (2.13)$$

$$b^* = \sqrt{\frac{F}{\pi}} \cdot \sqrt[4]{\frac{J_v}{J_u}};$$

де a^* і b^* - напівосі еліпсу, а F - площа плями дефекту, що визначається формулою (2.3)

- кут нахилу осей α :

$$\alpha = \alpha_0 \quad (2.14)$$

- об'єм порожнини у вигляді еліптичного конусу:

$$V = \frac{1}{3} F h \quad (2.15)$$

де h - максимальна глибина потоншення, F - площа плями дефекту, що визначається формулою (2.3);

- об'єм порожнини у вигляді еліпсоїду:

$$V = \frac{2}{3} F h; \quad (2.16)$$

- об'єм порожнини у вигляді еліптичного парабалоїду:

$$V = \frac{1}{2} F h; \quad (2.17)$$

На підставі даних вимірів товщини стінки прямолінійної ділянки трубопроводу, що розглядається, принципів побудови моделі дефекту-потоншення (пункти «а»-«д») та слідуючи алгоритму побудови (пункти «1»-«4») виконано моделювання дефекту-потоншення у вигляді поверхні еліпсоїду, еліптичного параболоїду та еліптичного конусу (Рис. 2.1).

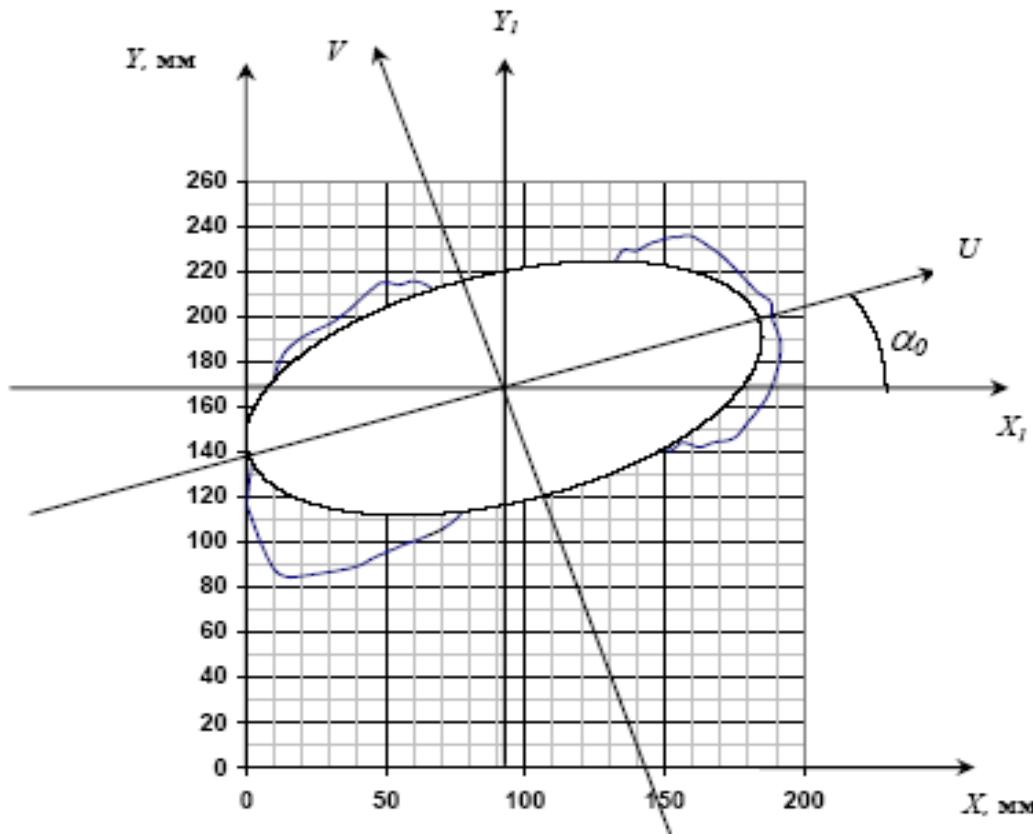


Рис. 2.1. Модель дефекту-стонышення у вигляді поверхні еліпсоїду

Основні результати розрахунку фрагментів трубопроводу з дефектом-потоншенням, який моделюється поверхнею еліпсоїду, еліптичного параболоїду та еліптичного конусу представлені на Рис. 2.2, Рис. 2.3.

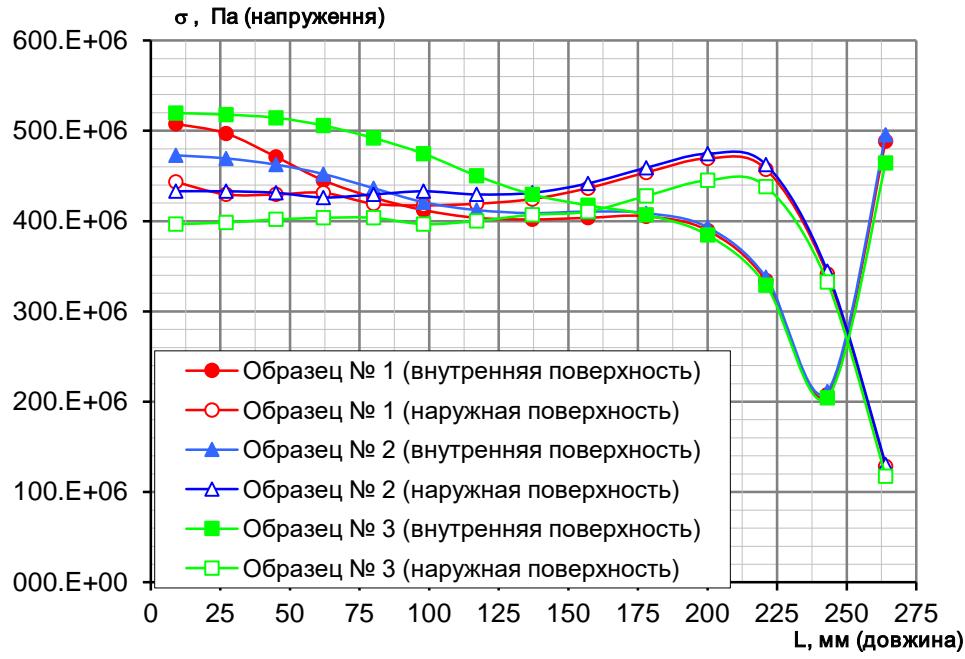


Рис. 2.2. Інтенсивність напруження на внутрішній і зовнішній поверхні в меридіональному напрямку для 3-х експериментальних зразків

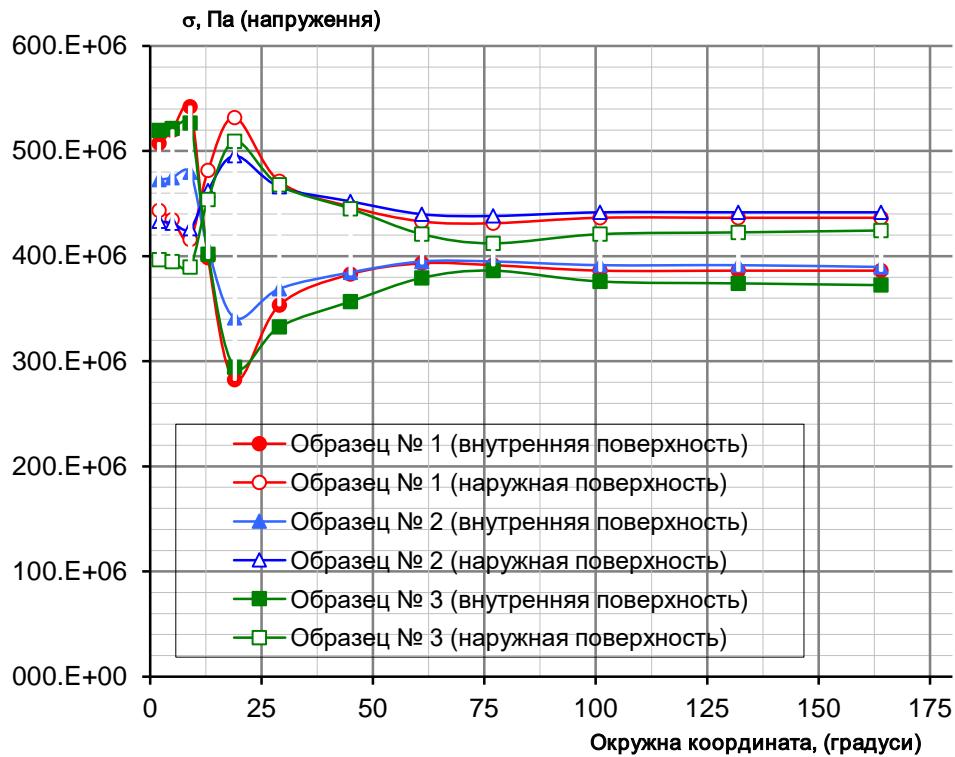


Рис. 2.3 Інтенсивність напруження на внутрішній і зовнішній поверхні в коловому напрямку для 3-х експериментальних зразків

В якості тестових задач, для яких існують експериментальні дані, були розглянуті

досліджувані зразки [167]. Кожен зразок представляв собою циліндричну оболонку (трубу) з привареними по торцях циліндуру двома плоскими днищами. Одно з днищ мало два штуцера для подачі всередину зразка робочої рідини і приєднання манометра. Конструкція зразка представлена на Рис. 2.4. На зазначену конструкцію для випробування зразка отримано Деклараційний патент на винахід [168].

На внутрішній поверхні труби робилось потоншення у вигляді полоси, орієнтованої вздовж твірної циліндуру (Рис. 2.4). Довжина циліндричної частини підбиралась так, щоб мінімізувати вплив краївих ефектів від дії плоских днищ на зону потоншення, яка являлася основним об'єктом дослідження. Зразки підлягали дії внутрішнього тиску, яке створювалося нагнітанням в конструкцію рідини. Метою дослідження було визначення внутрішнього тиску, при якому виникне руйнування зразків.

В якості тестового прикладу для розрахунків було обрано задачу про циліндричну оболонку з днищами при рівномірному внутрішньому тиску Рис.2.4 (в розрахунках використані наступні вихідні дані: розміри труби – $D_{\text{нар}}=325$ мм, товщина стінки $h=8.2$ мм; характеристики матеріалу – модуль пружності $E=2.06 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\nu=0.3$; навантаження – внутрішній тиск $P=24,4$ МПа). В якості аналітичного тестового розрахунку вирішено задачу Ляме відповідно до [172] та задачу для тонкостінної циліндричної оболонки відповідно до [173]. Для аналітичного рішення використані вихідні дані, зазначені вище.

Співставлення аналітичних і отриманих за ПЗ ДИПРОС результатів показало, що розбіжність між ними не перевищує 3.2 % (див таблиці 2.1, 2.2).

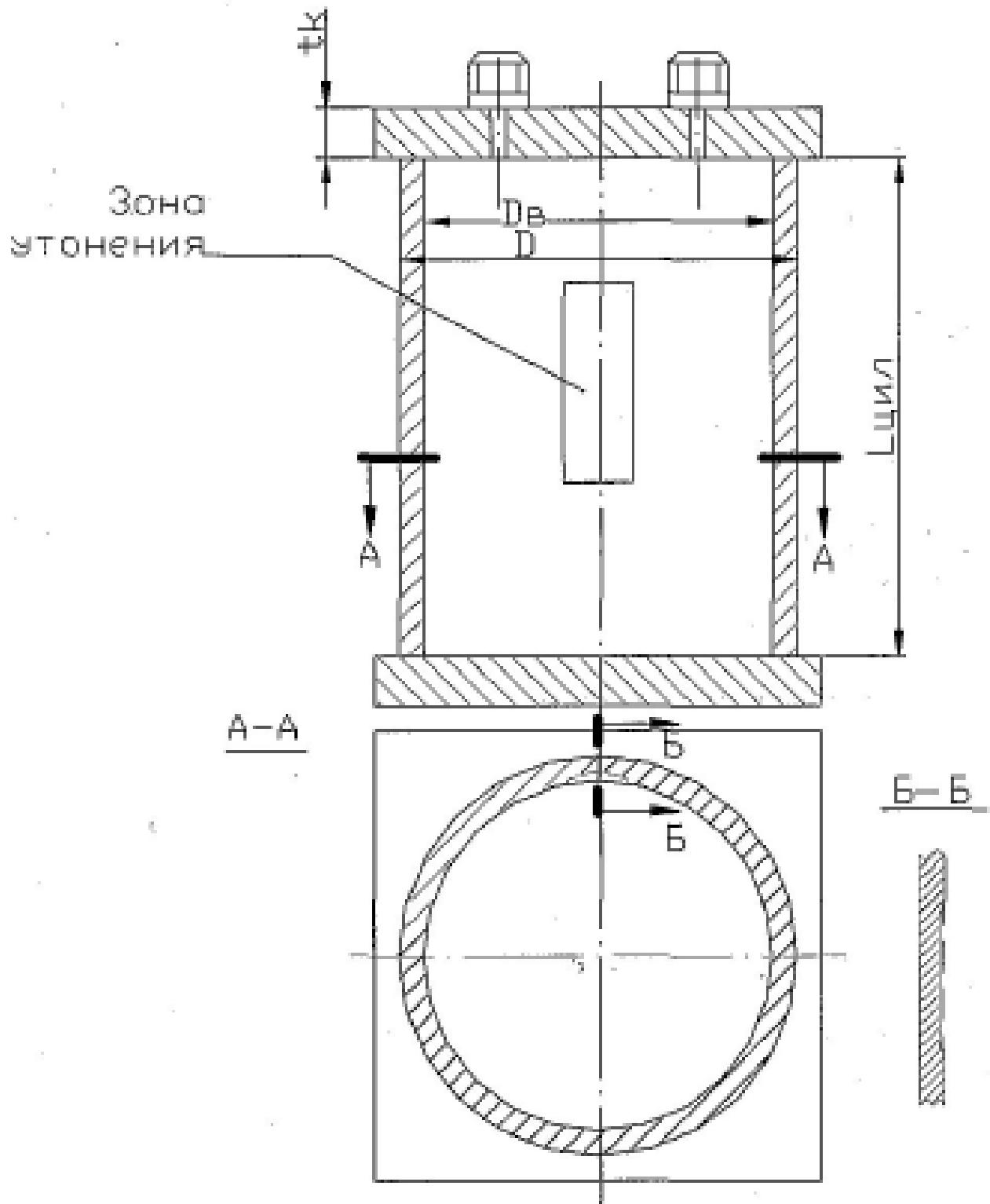


Рис. 2.4. Конструкція досліджуваного зразка [168]

Таблиця 2.1. Співставлення аналітичного тест - розв'язку і отриманих за ПЗ ДИПРОС

Параметр напружено-деформівного стану	Аналітичний розв'язок [172]	Розв'язок по ПЗ ДИПРОС [169]	Відносна похибка
Радіальне напруження на серединній поверхні (σ_r) , МПа	238,72	235,537	-1.4588 %
Колове напруження на серединній поверхні (σ_θ) , МПа	477,44	474,814	-0.046 %
Нормальний прогин серединної поверхні w , мм	0,31155	0,3214	3,1616%

Таблиця 2.2. Характеристики зразків і результати випробувнь

№ зразка	Зовнішній діаметр, мм	Товщина стінки, мм	Потоньшення стінки, мм			Тиск руйнування, МПа	
			довж ина	шири на	глиби на	Розрахунок ДИПРОС	Експеримент [167]
1	325	8.18	100.6	60	1.42	25.3	25.2
2	325	8.20	160.0	60	0.69	25.4	25.5
3	325	8.20	214.0	60	1.10	25.4	24.4

При розрахунковому моделюванні експериментальних зразків (№№ 1 – 3) в ПЗ ДИПРОС, в силу їх симетрії, розглядалася 1/4 частина конструкції. Внутрішній тиск приймався рівним тиску руйнування згідно експерименту. Задачу розв'язано у пружній постановці. Розвиток пластичних деформацій не враховувався.

Результати розрахунку, які представлені у вигляді графіків зміни інтенсивності напружень на внутрішній і зовнішній поверхні (рис. 2.2, 2.3) підтвердили, що при

заданому навантаженні руйнування конструкції проходить по зоні потоншення. В меридіональному напрямку дефект (потоншення) призводить до незначної зміни напружень на внутрішній поверхні труби і практично не впливає на НДС її зовнішньої поверхні (рис. 2.2). Графік інтенсивності напружень в коловому напрямку (рис. 2.3) в околиці потоншення має різкий стрибок – ріст інтенсивності напружень на зовнішній поверхні і їх зменшення на внутрішній.

При проведенні досліджень розглянуто, зокрема дефект-потоншення прямолінійної ділянки тонкостінного трубопроводу (зовнішній діаметр 530 мм, товщина стінки 8 мм).

За результатами технічної діагностики були отримані значення товщини стінки на ділянці 191,8 мм з кроком виміру 27,4 мм (див. табл. 2.3 і рис. 2.5) та контури стоншення (рис. 2.6). Для оцінки впливу різних моделей дефекту-потоншення на напружений стан конструкції було виконано три постановки однієї задачі, в яких змінювалась тільки форма поверхні дефекту при постійному об'ємі порожнини.

Задача оцінки впливу моделі дефекту на напружений стан конструкції вирішувалась за допомогою чисельних методів із застосуванням програмного коду ДИПРОС.

Таблиця 2.3. Значення товщини стінки ділянки трубопроводу в місцевій системі координат

Параметр	Значення							
Місцева координата (вздовж осі труби), мм	0	27,4	54,8	82,2	109,6	137,0	164,4	191,8
Товщина стінки труби, мм	8,0	6,8	6,4	5,0	5,1	6,0	6,2	8,0

Поверхня потоншення моделюється поверхнею еліпсоїду, еліптичного параболоїда або еліптичного конусу в залежності від реальної поверхні. При цьому головна вісь поверхні проходить через центр еліпса в основі і перпендикулярна йому, а об'єм зmodeльованої порожнини повинен максимально відповідати об'єму реального дефекту.

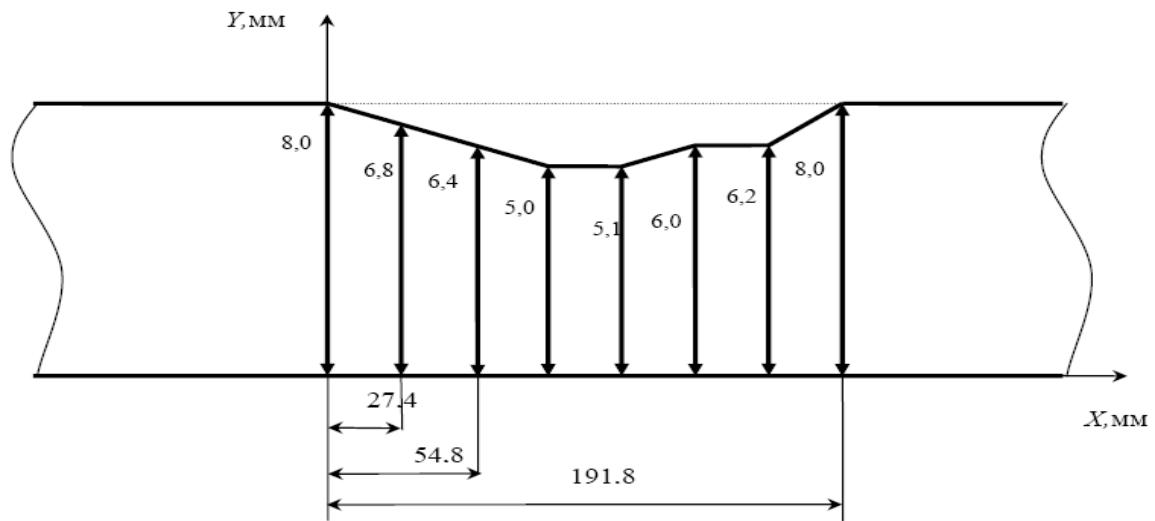


Рис.2.5. Ескіз трубопроводу із значеннями товщини стінки згідно з даними контролю

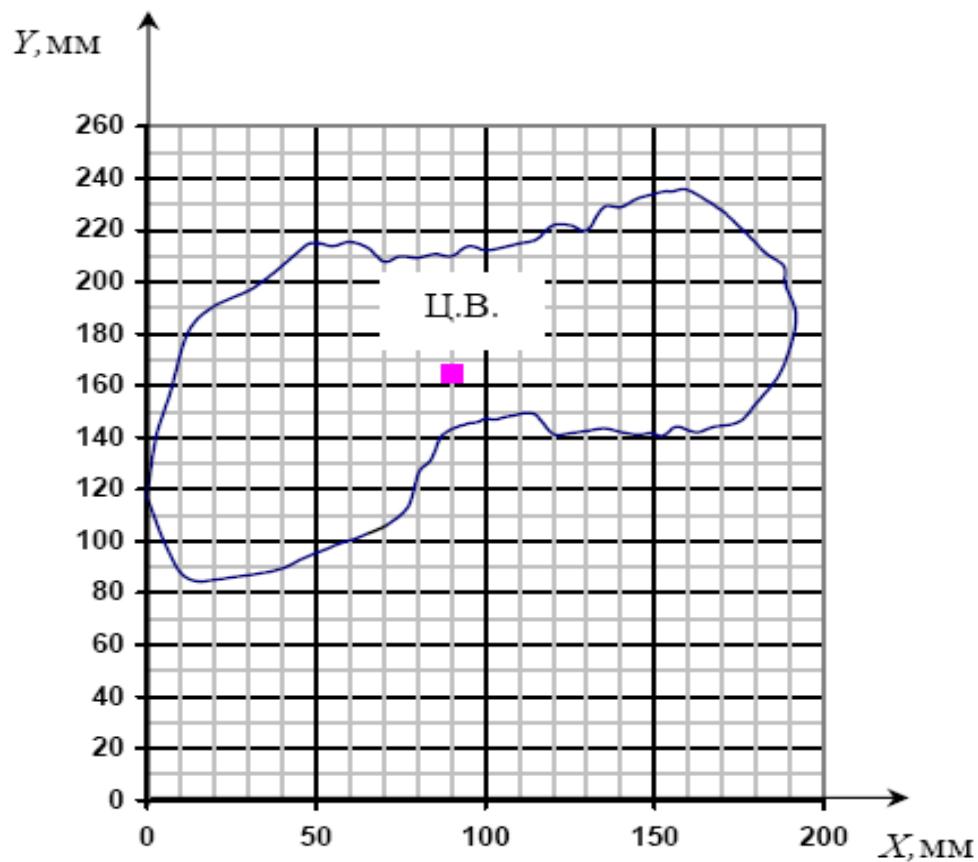


Рис.2.6. Розміри та орієнтація дефекту в плані за даними товщинометрії

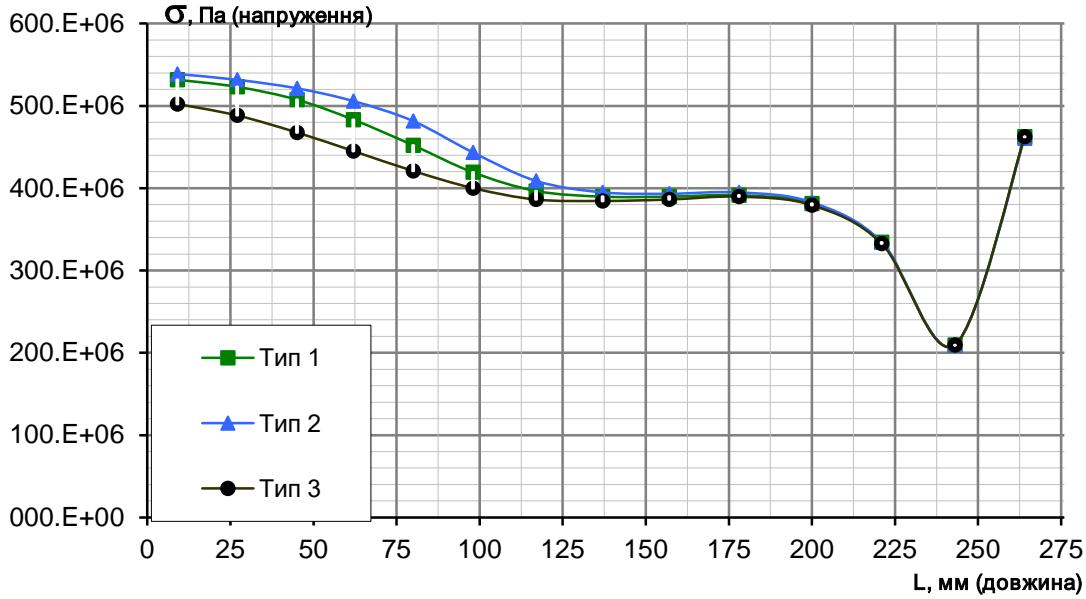


Рис. 2.7. Інтенсивність напружень на внутрішній поверхні в меридіональному напрямку для 3-х типів потоншення
(1- еліптичний параболоїд; 2- еліпсоїд; 3 – еліптичний конус).

При недостатній інформації про глибину і форму поверхні ЕКП вона моделюється у вигляді конічної порожнини, для якої:

- направляючою лінією є контур плями дефекту;
- вершина конусу знаходитьться на перпендикулярі, проведенному з геометричного центру (центру інерції) плями дефекту;
- відстань від центру інерції плями дефекту до вершини конусу приймається рівною найбільш вирогідній глибині потоншення (при необхідності з запасом).

Для оцінки впливу на розрахункове НДС конструкції в зоні дефекту різних геометричних моделей ЕКП виконані три постановки однієї задачі, в яких мінялась тільки форма поверхні дефекту (потоншення) при постійному об'єму порожнини. Графічно інтенсивність напружень в меридіональному, коловому напрямках для 3-х постановок представлені на рис. 2.8-2.10.

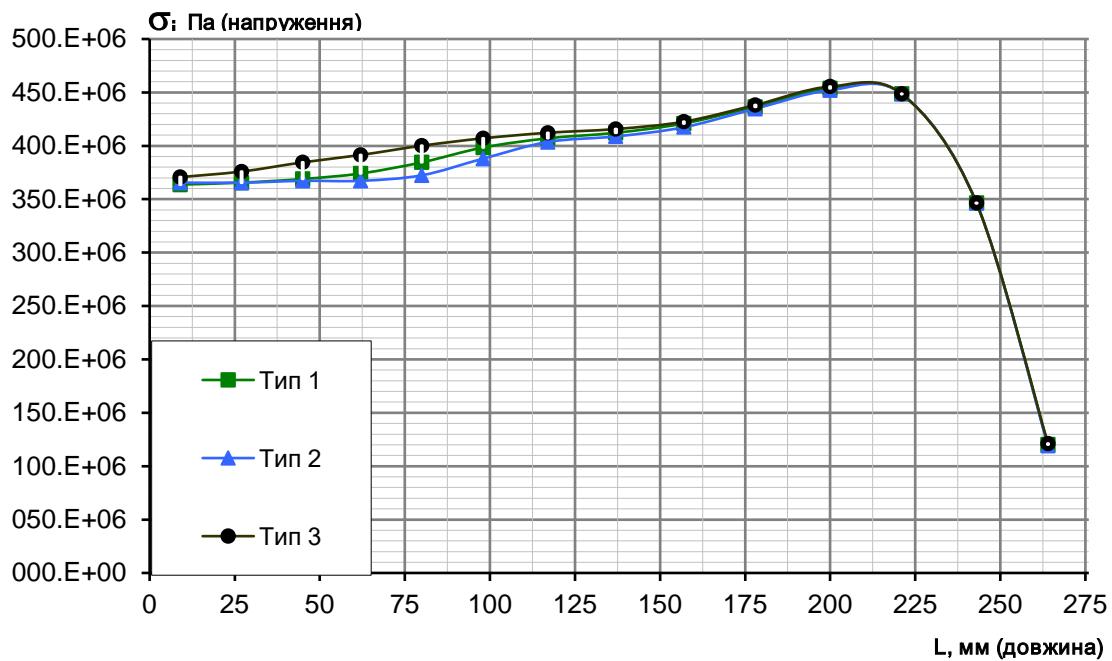


Рис. 2.8. Інтенсивність напружень на зовнішній поверхні у меридіональному напрямку для 3-х типів потоншень

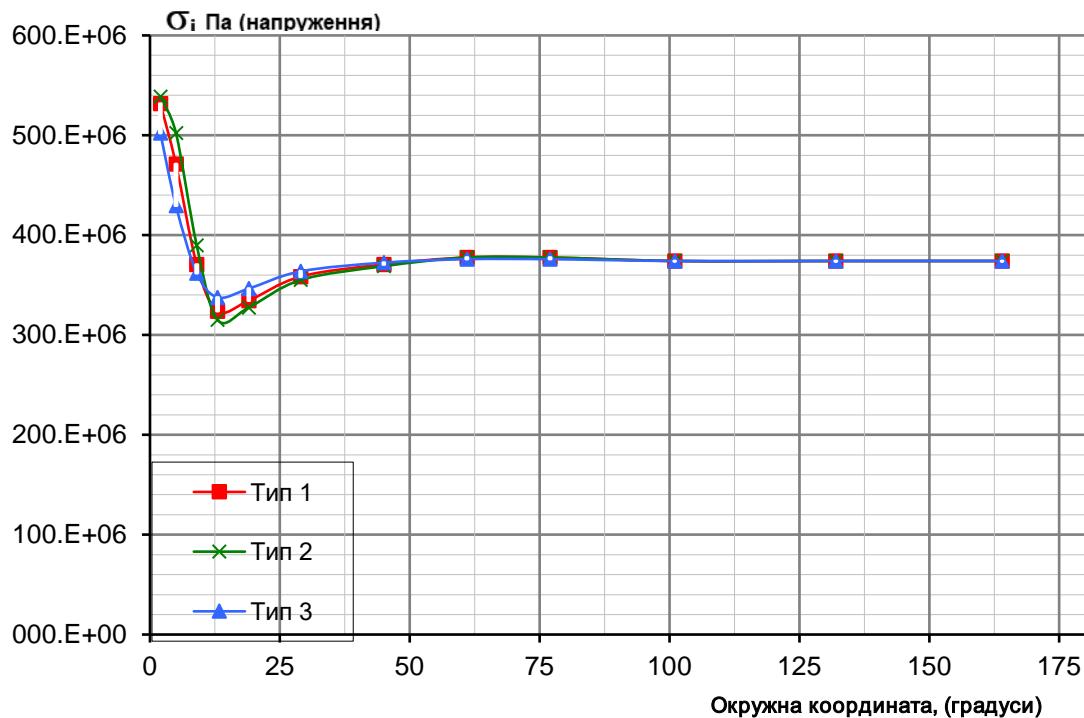


Рис. 2.9. Інтенсивність напружень на внутрішній поверхні в окружному напрямку для 3-х типів потоншень

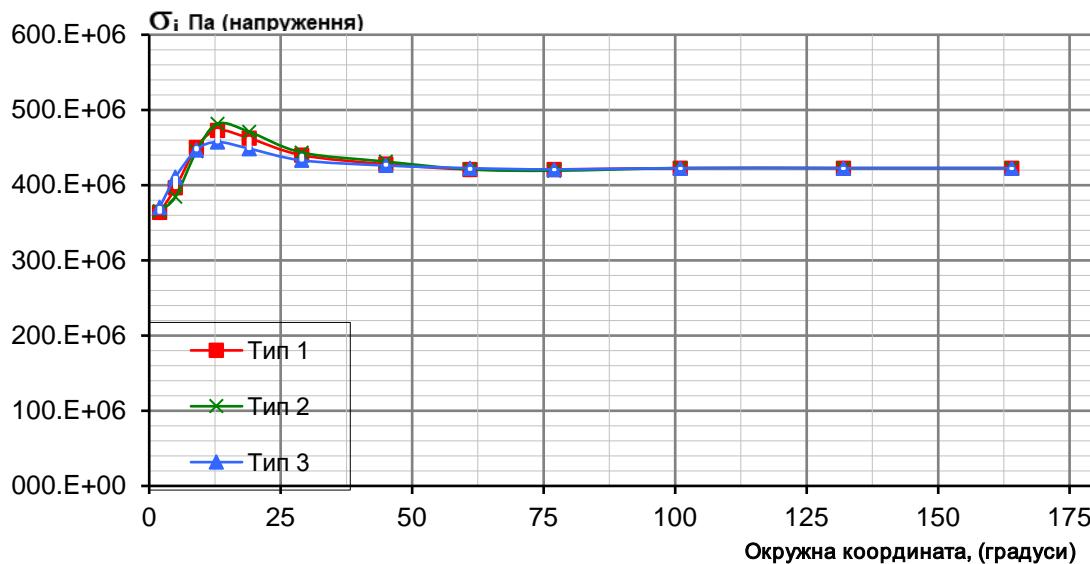


Рис. 2.10. Інтенсивність напружень на зовнішній поверхні в окружному напрямку для 3-х типів потоншень

На Рис. 2.8-2.10 типи потонщень такі:

Тип 1 – відповідає розрахунку труби із змодельованим дефектом (потоншення) у формі еліптичного параболоїда;

Тип 2 - відповідає розрахунку труби із змодельованим дефектом (потоншення) у формі еліпсоїда.

Тип 3 - відповідає розрахунку труби із змодельованим дефектом (потоншення) у формі еліптичного конуса.

Аналіз графіків на рис. 2.8-2.10 свідчить, що найбільш консервативною з точки зору виникаючих напружень поверхнею є еліпсоїд. Виходячи з цього, в подальших розрахунках, при геометричному моделюванні поверхонь з дефектами у вигляді потоншення або тріщини перевага буде надаватися поверхні еліпсоїду.

2.2. Визначення допустимих товщин елементів трубопроводів

Метою роботи є підвищення рівня безпеки АЕС при керуванні аварією на основі більш точної оцінка цілісності ТОТ ПГ при організації підживлення парогенераторів

в умовах повного знеструмлення майданчику АС. Оскільки математичне моделювання і дослідження протікання аварійних сценаріїв в ПГ планується з використанням програмного засобу “ANSYS” [146, 170], то розроблені методи дослідження впливу потоншення стінок трубопроводів на їх НДС [120-124] необхідно розвинути і адаптувати для застосування “ANSYS” [146-170]. Особливо це стосується ТОТ ПГ, які експлуатуються в найбільш важких хімічних та ерозійно-корозійних умовах. У процесі експлуатації виявлялись різні випадки пошкодження ТОТ. Такі випадки були зумовлені здебільшого наявністю дефектів двох основних типів: *потоншення стінки* (спричинене корозійною виразкою або плямою) та *тріщина* (також спричинена корозійними процесами агресивного хімічного середовища експлуатації ПГ). З погляду впливу такого ефекту старіння як потоншення стінки розглянуто підходи до визначення мінімально допустимої товщини стінки прямої ділянки та гину трубопроводу, а для оцінки впливу тріщини розглянуто підходи до її оцінки з погляду механіки руйнування.

За наявності таких дефектів розрахунок спрямовано на визначення:

- ступеню небезпеки тріщини з урахуванням її геометричних розмірів;
- мінімально-допустимої товщини стінки трубопроводу.

2.2.1 Визначення ступеню небезпеки тріщини з урахуванням її геометричних розмірів

Визначенню впливу ступеню небезпеки дефектів на міцність трубопроводів різними методами присвячено багато наукових праць та досліджень. Їх результати узагальнені зокрема в таких роботах, як [137-141].

За останні десятиріччя напрацьована досить значна кількість методів оцінки дефектів, які засновуються на результатах масштабних експериментальних досліджень у сукупності із теоретичними дослідженнями. Найбільш відомим прикладом є результати та емпіричні формули, отримані інститутом ім. Баттеля (США). Ці формули використовують лише один параметр матеріалу, який пов'язаний із характеристиками його міцності. Формули інституту Баттеля лягли в основу

граничних критеріїв для корозійних дефектів в трубопроводах у багатьох нормативних документах. На поточний час все більш широке застосування у трубопровідній промисловості набувають універсальні документи оцінки міцності елементів, які містять дефекти. Це пояснюється тим, що механізми пошкодження і методи оцінки залишкової міцності в цілому є загальними для різних матеріалів і не вкладаються у прості емпіричні схеми. Саме труднощами постановки задачі пояснюється той факт, що до останнього часу у більшості визнаних світових стандартів на експлуатацію трубопроводів були закладені принципи вибракування вм'ятин, які є характерними для стандартів на їх виготовлення. Тобто допустимі розміри дефектів визначаються виходячи лише із їх розмірів (глибини) і не залежать від реального навантаження трубопроводу і його фізичних властивостей, особливо у тих випадках, коли фізичні властивості можуть змінюватись у часі (підлягають старінню) в залежності від умов експлуатації. Визначено, що оцінка критеріїв небезпеки вм'ятин, які враховують лише глибину вм'ятин, може привести до непотрібних ремонтів при допустимих вм'ятинах, так і до пропуску потенційно небезпечних дефектів, які можуть містити тріщину, що може привести до порушення цілісності трубчатих елементів. Удосконалення критеріїв пов'язано, у першу чергу, із можливим використанням деформаційних властивостей і індивідуального розрахунку кожного дефекту методами скінченних елементів.

Саме такий підхід (щодо індивідуального розрахунку) і використано у цій дисертаційній роботі. У тих випадках, де максимальні напруження співпадають з мінімальними властивостями матеріалу, в інженерній практиці прийнято підхід постулювання поверхневих тріщиноподібних дефектів. Тріщини можуть бути поздовжніми та поперечними і мати різні геометричні розміри. Приймається, що тріщина вже наявна у трубчастому елементі ПГ і утворилася внаслідок агресивної дії середовища (хімічного та термічного), в якому працює ПГ.

Початок зростання тріщини передбачає визначення критичного стану рівноваги в узгодженні із критеріями механіки руйнування. Критерій руйнування доволі багато,

проте практичне застосування та загальне визнання отримали лише декілька [142-145]. До цих критеріїв слід віднести такі: коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН, K_I), інваріантний енергетичний інтеграл (J – інтеграл) і розкриття тріщини у своїй вершині (δ). І саме ці критерії закладені в основу розрахунку тріщин за програмою ANSYS [170], яку використано в рамках цієї роботи.

Підходи для розрахунку коефіцієнту інтенсивності напруження (КІН) (K_I) знайшли широке застосування у нормах і правилах, що діють в галузі атомної енергетики, визнані консервативними і використовуються при проектуванні.

Умову міцності в цьому випадку або умову досягнення граничного стану можна записати як:

$$K_I \leq K_{IC} \quad (2.18)$$

де:

K_{IC} – граничний КІН (в'язкість руйнування), являє собою механічну характеристику матеріалу, яка характеризує його опір зростанню тріщини при крихкому руйнуванні. Ця величина визначається експериментально.

КІН (K_I) згідно з різними джерелами може визначатись різними засобами. Наприклад відповідно до ПНАЭ Г-7-002-86 [153] коефіцієнт інтенсивності напруження, $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, для циліндричних, сферичних, конічних, еліптичних, плоских елементів, що навантажені внутрішнім тиском і температурним впливом, допускається визначати за формулою:

$$K_I = \eta \left(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q \right) \left(\pi \frac{a}{10^3} \right)^{1/2} / Q, \quad (2.19)$$

де η - коефіцієнт, що враховує вплив концентрації напруження; σ_p - складова напруження розтягу, МПа; σ_q - складова згиальних напружень, МПа; $M_p = 1 + 0,12(1 - a/c)$; $M_q = 1 - 0,64a/h$; a – глибина тріщини, мм; c – напівдовжина тріщини, мм; h – довжина зони, в границях якої складова згиальних напружень зберігає позитивне значення, мм;

$$Q = \left[1 + 4,6(a/2c)^{1,65} \right]^{1/2}. \quad (2.20a)$$

Згідно з положеннями ПНАЭ Г-7-002-86 [153] формули 2.19 та 2.20а застосовні при таких співвідношеннях параметрів $a \leq 0,25s$ і $a/c \leq 2/3$, де s - товщина стінки виробу.

Коефіцієнт, що враховує вплив концентрації напружень (η) для зон отворів, під'єднання патрубків, штуцерів, труб визначається за формулами 2.20б та 2.20в:

при $s/R \leq 0,8$

$$\eta = [1 + 5(K_\sigma - 1) \exp(-0,86 s/R_1)]^{1/2} \quad (2.20\text{б})$$

при $s/R > 0,8$

$$\eta = [1 + 5(K_\sigma - 1) \exp(-0,86 s/R_1)]^{1/2} \quad (2.20\text{в})$$

при цьому R_1 - радіус отвору

При розрахунку зон, де відсутня концентрація напружень, приймають:

$$\eta = 1.$$

Границний КІН K_{IC} , характеризує певний матеріал у певних умовах експлуатації (температура, швидкість навантаження тощо). Матеріалом трубчатки ПГ є сталь 08Х18Н10Т. Водночас в нормативній документації України не регламентується значення критичного КІН для сталі аустенітного класу марки 08Х18Н10Т. Наявні результати досліджень [147-149] в'язкості руйнування сталі 08Х18Н10Т дозволяють стверджувати, що на відміну від малолегованих і вуглецевих сталей, аустенітні нержавіючі сталі (зокрема 08Х18Н10Т) не проявляють різкого в'язко-крихкого переходу. Результати досліджень, що викладені у [149], щодо тріщиностійкості аустенітних сталей марки 304 для реакторів кип'ячого типу при флюєнсах від $1 \cdot 10^{21}$ до $6 \cdot 10^{21}$ н/см² показують, що рівень насичення тріщиностійкості цих сталей складає 55 МПа·м^{1/2}. Аналогічні закономірності [147-148] виявлені для сталі 10Х18Н9 у

діапазоні температур 20–400°C. Проте ТОТ ПГ не схильні до нейтронного опромінення і приймаючи до уваги вказані вище фактори, в якості критерію можна консервативно прийняти допустиме значення КІН (вказано для температури 350°C):

$$[K_I] = 55 \text{ Мпа} \times \text{м}^{1/2}. \quad (2.21)$$

Розрахунки КІН (K_I) виконуються методами лінійної теорії пружності в рамках лінійної механіки руйнування.

Інваріантний енергетичний інтеграл (J – інтеграл або інтеграл Черепанова-Райса), який характеризує потік енергії у вершину тріщини. По суті розрахунок J – інтегралу є альтернативним засобом розрахунку КІН (K_I) у випадку лінійного розрахунку. При цьому, у випадку крихкого руйнування, приймається, що $J=G$ (де G швидкість вивільнення пружної енергії деформації). Так, КІН та J – інтеграл зв'язані між собою співвідношенням для плоского деформованого стану:

$$K_I = \sqrt{\frac{G \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (2.22)$$

де:

ν – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль пружності [МПа]

В цьому випадку КІН (K_I) визначається засобами, які наведено вище. Найбільш вагоме значення J – інтеграл набуває у випадку врахування пластичного деформування у вершині тріщини і це призводить до того, що $J > G$ і виникає необхідність перевірки тріщиностійкості конструкції за критерієм руйнування нелінійної механіки руйнування у вигляді:

$$J_I \leq J_{IC} \quad (2.23)$$

J_{IC} є характеристикою матеріалу, що визначається експериментальним шляхом, наприклад за ГОСТ 25.506-85 [152].

Ці загальні положення механіки руйнування знайшли своє відображення у конкретних розрахунках постулюваної тріщини у трубчастих елементах ПГ.

Для оцінки цілісності ТОТ обрано зовнішню лінію ТОТ верхнього шару трубчатки, що має максимально великі відстані між опорними елементами, з максимальними температурними деформаціями. При цьому для обраної лінії ТОТ прийняті максимуми, отримані за результатами аналізу НДС при перехідному процесі і обрано фрагмент, який знаходиться у зоні максимального зашламування.

Зони локалізації дефектів ТОТ відповідають ділянкам трубного пучка з найвищою концентрацією корозійно-активних домішок (див. Рис. 3.1). У тих випадках, де максимальні напруження поєднуються з мінімальними властивостями матеріалу, в інженерній практиці прийнято підхід постулювання поверхневих тріщиноподібних дефектів.

Основними характеристиками матеріалу, що використовуються у розрахунку, є критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} , і границя плинності $Rp^T_{0,2}$.

Враховуючи картину локалізації екстремумів напружень і характер НДС у поперечному перетині ТОТ, розташування повздовжньої тріщини прийнято перпендикулярно дючим окружним напруженням в зоні 11-ї дистанціонуючої решітки, яка також є зоною максимального скучення шламу. У цьому випадку постулюється повздовжня тріщина на нижній (опорній) стороні стінки лінії ТОТ.

У розглянутому випадку розміри поверхневої тріщини прийнято згідно з вимогами ПНАЭ Г-7-002-86 [153] наступним чином:

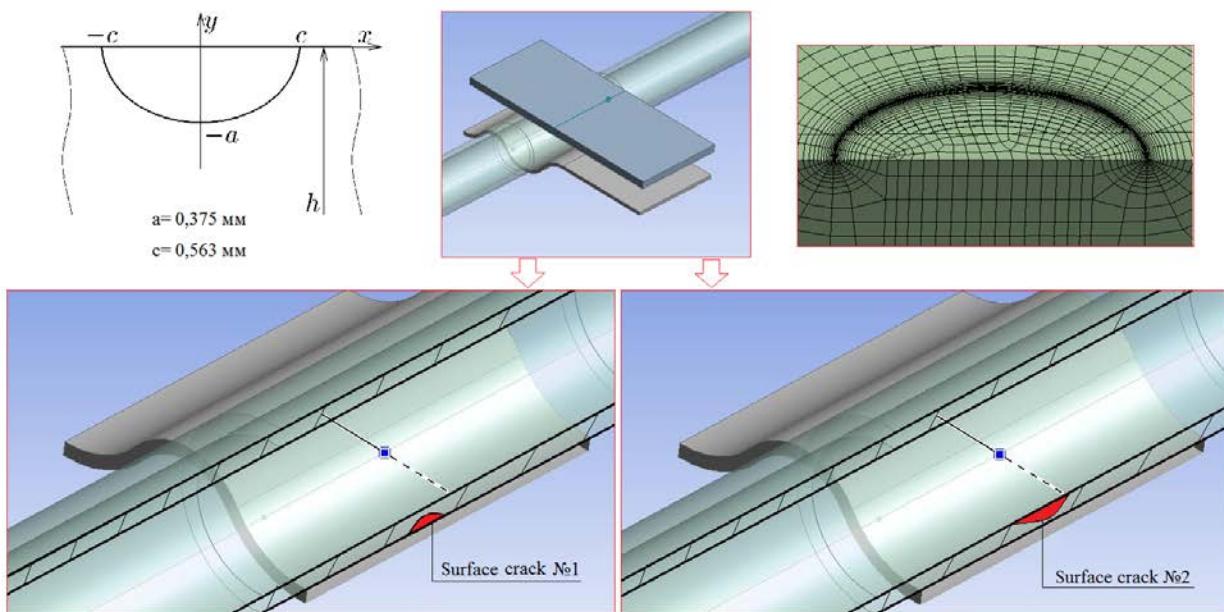
- глибина $a = 0,375$ мм (що складає 25% товщини стінки трубки теплообмінної поверхні $1,5 \cdot 0,25 = 0,375$),
- напівдовжина $l = 0,563$ мм.

Результати розрахунку КІН (аналітичний розв'язок) за формулою (2.19) із параметрами тріщини, що зазначені вище, свідчать про те, що КІН дорівнює:

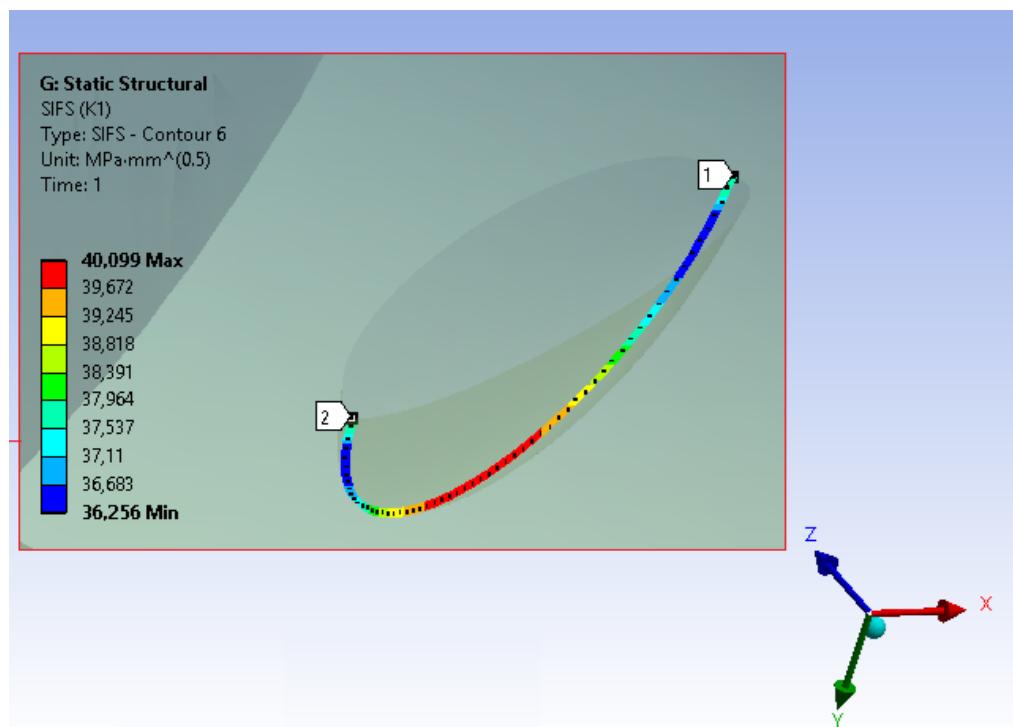
$$K_I = \eta \left(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q \right) \left(\pi \frac{a}{10^3} \right)^{1/2} / Q = 1,713 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$$

Результати розрахунку КІН із застосуванням ANSYS (чисельний розв'язок) із постулюванням тріщини для зовнішньої і внутрішньої поверхні представлена на

рисунку 2.11.



а) постуляція тріщини на зовнішній і внутрішній поверхні



б) Розрахунок КІН

Рис. 2.11 Постуляція тріщини та розрахунок КІН

Результати аналітичного та чисельного розв'язку представлені у Таблиці 2.4 і свідчать про те, що результати доволі добре узгоджуються між собою

Таблиця 2.4 Результати обчислення КІН

Засіб	КІН	K_I	$[K_I]$
	$\text{МПа} \times \text{м}^{1/2}$		
Аналітичний розв'язок (за формулами ПНАЕ Г-7-002-86)	1.713	55	
Чисельний розв'язок (ANSYS)	1.290		

Представлені результати постуляції тріщини та розрахунку КІН по фронту тріщини (Рис. 2.11а, 2.11б) свідчать про те, що максимальне значення КІН на внутрішній і зовнішній поверхнях майже не відрізняється одне від одного, що характерно для тонкостінних оболонок та оболонок середньої товщини за рахунок відсутності суттєвого температурного градієнта по товщині стінки при термосиловому навантаженні.

$$K_{\text{max}} = 40 \text{ МПа} * \text{м}^{1/2} (1,29 \text{ МПа} * \text{м}^{1/2}). \quad (1.26)$$

2.2.2 Визначення мінімально-допустимої товщини стінки трубопроводу

Дефекти, які є наслідком ерозійно-корозійних пошкоджень не розглядаються як "гострі", тобто тріщиноподібні дефекти. Їх лінійні розміри (довжина або ширина) набагато більші глибини, до того ж матеріал трубок ПГ є достатньо в'язким. Тому у цьому випадку при розв'язуванні задач з пошкодженнями у вигляді ЕКП застосовано теорію граничної пластичної рівноваги.

Визначення мінімально допустимої товщини стінки трубопроводу виконується із застосуванням інженерних підходів механіки деформованого твердого тіла. В розрахунку ставляться дві основні задачі:

- визначення ступеню небезпеки дефекту ЕКП з урахуванням геометричних розмірів;
- визначення мінімально-допустимої товщини стінки трубопроводу.

За свою конфігурацією теплообмінна трубка являє собою прямі ділянки та згини, тому подальші випадки спрямовані саме на ці елементи.

В розрахунку розглядаються три категорії розрахункових напружень: $(\sigma)_1$ (група приведених напружень, що визначається за складовими загальних мембраних напружень), $(\sigma)_2$ (група приведених напружень, що визначається за складовими загальних або місцевих мембраних і загальних згиальних напружень), $(\sigma)_{Rk}$ (максимальних розмах приведених напружень з урахуванням температурної складової), які визначаються відповідно до вимог ПНАЭ Г-7-002-86 [153].

Дляожної категорії напружень встановлюються власні допустимі напруження ($[\sigma]$), а саме:

- для $(\sigma)_1$ це $[\sigma]$, тобто $(\sigma)_1 \leq [\sigma]$;
- для $(\sigma)_2$ це $1,3[\sigma]$, тобто $(\sigma)_2 \leq 1,3[\sigma]$;
- для $(\sigma)_{Rk}$ це $(\sigma)_{Rk} = \left(2 - \frac{\sigma_T}{\sigma_B}\right) \cdot \sigma_T$, але не більше $2\sigma_T$, тобто $(\sigma)_{Rk} \leq [\sigma]_{Rk}$

де σ_T – границя плинності, а σ_B – границя міцності.

Розрахунки міцності, що виконуються відповідно до "атомних" норм, як правило, виконуються у пружній постановці. Це зроблено з погляду забезпечення відповідного ступеню консерватизму. В цьому аналізі з урахуванням реальних умов експлуатації трубок ТОТ, розглядаються потоншення загального вигляду, які характеризуються наступними розмірами: напівдовжиною « c », напівшириною « b » та глибиною « a » (див. Рис. 2.12).

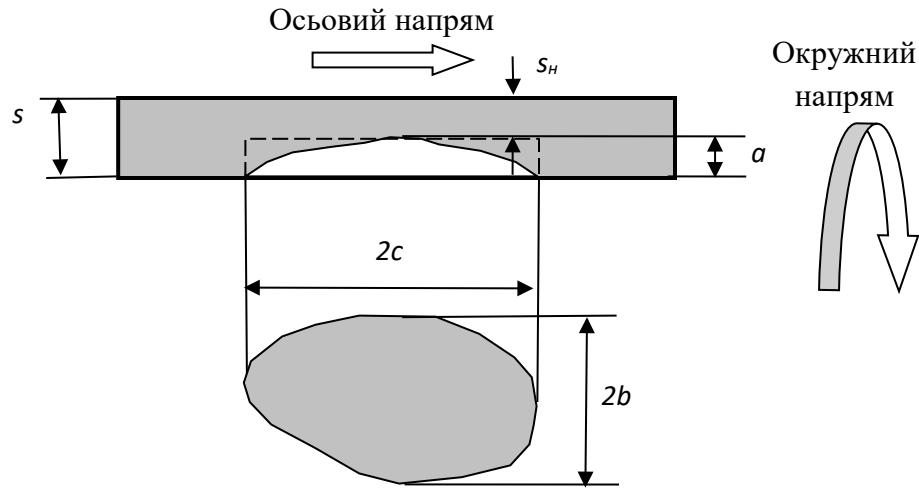


Рис. 2.12 Локальне потоншення стінки загального вигляду

Згідно з результатами досліджень ступеню небезпеки дефектів типу локальних потоншень у трубопроводах, які знайшли своє відображення у національних нормативних документах, зокрема у методиці [155], відмічається, що для потоншення загального вигляду і вузького дефекту встановлено обмеження « $0,3s$ », де s – товщина стінки.

Допустима товщина стінки прямої ділянки труби при послабленні в окружному напрямку

На Рис. 2-13 і 2-14 представлені графічні залежності допустимих розмірів дефекту ЕКП типу локальне потоншення загального вигляду. Графіки приводяться для різних співвідношень основних розмірів труби R_2/s ($R_2/s = 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$) [155] в координатах: $a/s - 2\lambda$, де a/s - відносна глибина дефекта, $2\lambda = 2c/\sqrt{R_m s}$ - відносна довжина дефекта в осьовому напряму.

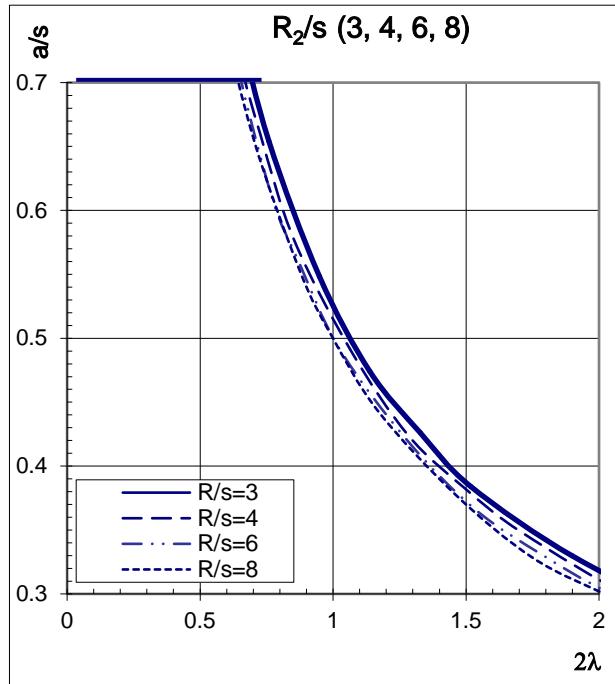


Рис. 2.13 Допустимі розміри дефекту
ЭКП для аналізу ослаблення в
окружному напрямку при малих
значеннях R_2/s
(початок графіка)

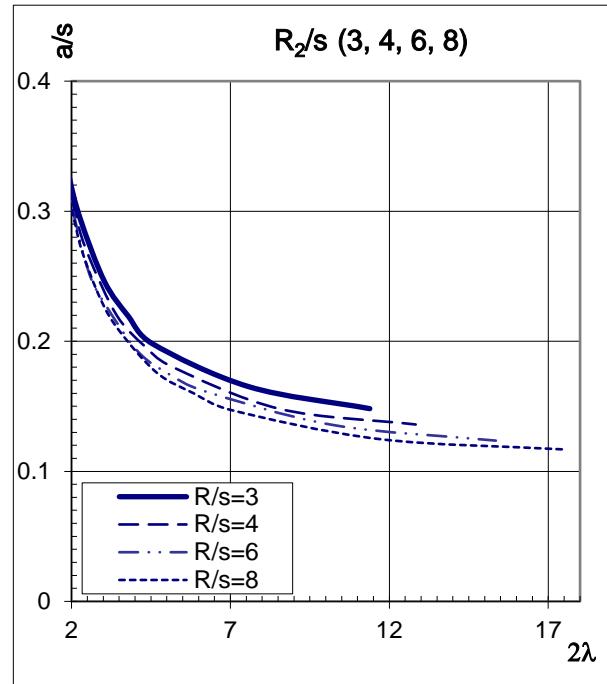


Рис. 2.14 Допустимі розміри дефекту
ЭКП для аналізу ослаблення в
окружному напрямку при малих
значеннях R_2/s
(продовження графіка)

Параметри, що використовуються при обчисленні допустимих дефектів представлені на Рис. 2.15.

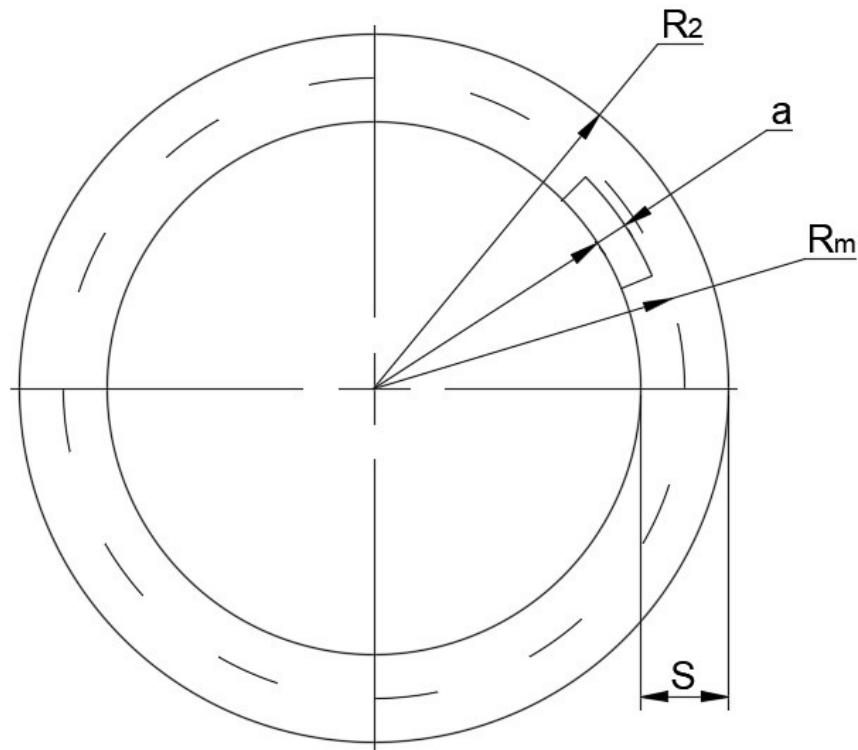


Рис. 2.15. Параметри, що використовуються при обчисленні допустимих дефектів

Значення мінімально допустимої товщини стінки визначається на підставі величини відносної глибини дефекту a/s , що визначається графічно, з використанням наступного виразу:

$$S_{\min \text{ доп изн}} = (1 - a/s)s.$$

Графіки обмежені значенням $a/s = 0,7$, що відповідає умові мінімально допустимого потоншення стінки $0,3s$.

Допустима товщина стінки прямої ділянки труби при ослабленні в осьовому напрямку

На рис. 2.16 і 2.17 представлена побудовані графічні залежності допустимих

дефектів ЕКП типу локальне потоншення загального вигляду. Графіки наведено для різних співвідношень розмірів труби R_2/s в координатах: $a/s - \varphi$, де a/s - відносна глибина дефекту, φ - кутова довжина дефекту в окружному напрямі (град). Графіки приведені для кутової довжини дефекту до 180 град.

Значення мінімально допустимої товщини стінки визначається так само як і у попередньому випадку $s_{\min \text{ доп изн}} = (1 - a/s)s$.

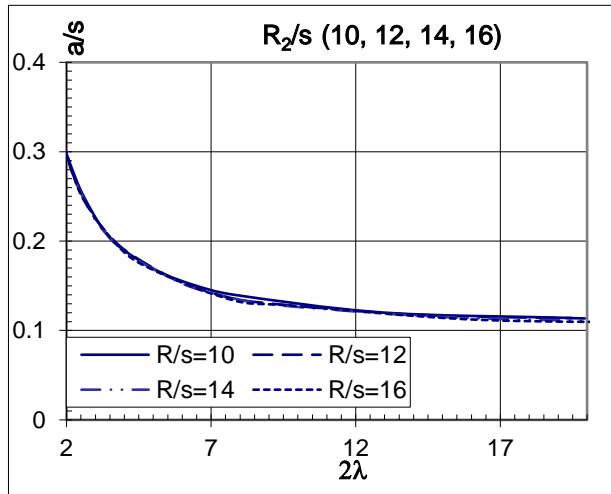


Рис. 2.16. Допустимі розміри дефекту ЕКП для аналізу ослаблення в осьовому напрямі при малих значеннях R_2/s

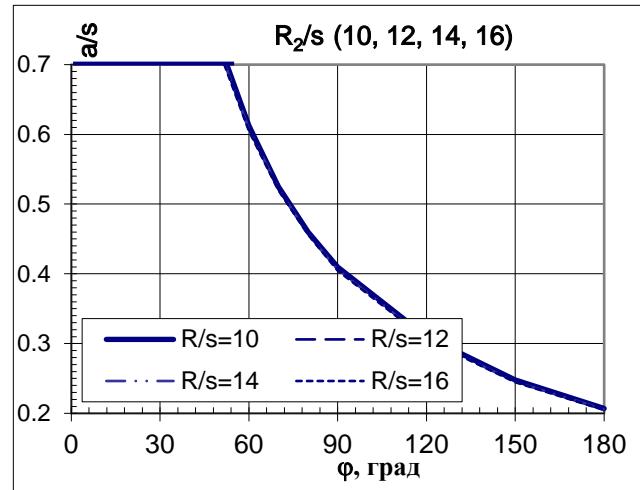


Рис. 2.17. Допустимі розміри дефекту ЕКП для аналізу ослаблення в осьовому напрямі при великих значеннях R_2/s

На Рис. 2-13, 2-14, 2-16, 2-17 представлена графіки гранично допустимих розмірів дефектів типу локальне потоншення загального виду [155]. Графіки побудовані на підставі результатів розрахунку, при якому значення мінімально допустимої товщини стінки $s_{\min \text{ доп знosc}}$ виконується методом підбору параметра « S » у виразах для визначення коефіцієнту « α ».

Виходячи із наведених вище співвідношень для прямої ділянки теплообмінної трубки мінімально допустиме потоншення загального вигляду, у припущені, що оцінка виконується у пружній постановці має скласти:

$$0,3s=0,3*1,5=0,45 \text{ мм.}$$

$$1,5-0,45=1,05 \text{ мм}$$

Проте ситуація ускладняється із визначенням мінімально допустимої товщини стінки ТОТ на ділянках із згином (гинах). Проблема гину полягає в тому, що при дії у повздовжньому напрямі глобального згинаючого моменту виникають додаткові напруження овалізації, які можуть призводити до локальних згінних моментів $M\varphi$, які в сумі із внутрішнім тиском є додатковим навантажувальним фактором. Така ситуація призводить до того, що для гину мінімально допустиме потоншення стінки буде відрізнятись від значення для прямої ділянки «0,3s».

Згідно з [155] номінальне розрахункове напруження без врахування загального НДС для прямої ТОТ визначається як:

$$(\sigma)_1^h = \frac{P(D-s)}{2s}, \quad 2.23$$

де D – зовнішній діаметр ТОТ.

Нижче у Таблиці 2.4 наведені результати аналітичного розрахунку напружень на прямій ділянці ТОТ, обчислені за формулою 2.23 для параметрів навантаження ТОТ, характерних для режиму НУЕ (параметри навантаження для режиму НУЕ вказані у Розділ 3.2.1 цієї роботи).

Таблиця 2.4. Результати аналітичного розрахунку напружень на прямій ділянці ТОТ в залежності від ступеню потоншення

Ступінь потоншення	Залишкова товщина стінки ТОТ (мм)	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження $(\sigma)_1^h$ (МПа) по (2.23)	Границя міцності R_m^T (МПа)
20%	1,20	177	60,43	412
30%	1,05	177	69,77	412
40%	0,90	177	82,21	412
50%	0,75	177	99,63	412
60%	0,6	177	125,77	412
70%	0,45	177	169,32	412
80%	0,3	177	256,43	412

Номінальне розрахункове напруження в гині ТОТ визначається як:

$$(\sigma)_1^h = \frac{P(D \cdot Y(\theta) - s)}{2s}, \quad 2.24$$

де функція гину визначається наступним чином:

$$Y(\theta) = \frac{1 + \beta 0.5 \sin \theta}{1 + \beta \sin \theta}. \quad 2.25$$

В формулі (2.25) кут θ характеризує положення повздовжньої вісі тріщини відносно перетину гину: $\theta = 0$, $\theta = 180$ (град) - середня частина гину; $\theta = 90$ - зовнішня сторона; $\theta = -90$ - внутрішня сторона; $\beta = D/2B$ - параметр кривини гину,

B - радіус гину (в місцях перегину ТОТ, згідно з даними проектної документації, $B=60$ мм).

Нижче, у Таблиці 2.5 наведено результати розрахунку напруження на зовнішній стороні ТОТ у гині при експлуатації у режимі НУЕ в залежності від ступеню потоншення.

Таблиця 2.5. Результати розрахунку напруження на зовнішній стороні ТОТ при НУЕ в залежності від ступеню потоншення

Ступінь потоншення	Залишкова товщина стінки ТОТ (мм)	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження $(\sigma)_1^H$ (МПа) по (2.24)	Границя міцності R_m^T (МПа)
20%	1,20	177	56,592	412
30%	1,05	177	65,376	412
40%	0,90	177	77,089	412
50%	0,75	177	93,63	412
60%	0,6	177	118,08	412
70%	0,45	177	159,08	412
80%	0,3	177	241,07	412

У Таблиці 2.6 наведено розрахунок напруження на внутрішній стороні ТОТ.

Таблиця 2.6. Результати розрахунку напруження на внутрішній стороні ТОТ при НУЕ в залежності від ступеню потоншення

Ступінь потоншення	Залишкова товщина стінки ТОТ (мм)	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження $(\sigma)_1^H$ (МПа) по (2.24)	Границя міцності R_m^T (МПа)
20%	1,20	177	65,46	412
30%	1,05	177	75,51	412
40%	0,90	177	88,91	412

Ступінь потоншення	Залишкова товщина стінки ТОТ (мм)	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження $(\sigma)_1^h$ (МПа) по (2.24)	Границя міцності R_m^T (МПа)
50%	0,75	177	107,67	412
60%	0,6	177	135,81	412
70%	0,45	177	182,72	412
80%	0,3	177	276,53	412

При аналізі ослаблення у поперечному напряму від наявності повздовжнього дефекту у гині труби допускається застосування наступної консервативної методики [155], яка складається із наступних послідовних кроків:

- визначення коефіцієнту пластичного ослаблення для дефекту під дією внутрішнього тиску:

$$\alpha_p = \frac{1 + 2\lambda^2\tau(1 - \tau)}{1 + 2\lambda^2(1 - \tau)}, \quad 2.26$$

де $\lambda = c / \sqrt{R_m s}$ – безрозмірна напівдовжина дефекту;

- визначення коефіцієнту пластичного ослаблення для дефекту під дією згинного моменту:

$$\alpha_M = \frac{1 + 2(c/R_m)^2 \tau^2(1 - \tau^2)}{1 + 2(c/R_m)^2(1 - \tau^2)}; \quad 2.27$$

- визначення розрахункових напружень з урахуванням сумісної дії двох факторів:

$$\sigma_r^d = \frac{\sigma_r^{M_\varphi} / \alpha_M + \sqrt{(\sigma_r^{M_\varphi} / \alpha_M)^2 + 4(\sigma_\varphi / \alpha_p)^2}}{2}, \quad 2.28$$

де $\sigma_r^{M_\varphi} = \frac{4M_\varphi}{s^2}$ - локальні моментні напруження; M_φ - локальний згинальний момент, $\sigma_\varphi = \frac{PR_m}{s}$ - окружні напруження.

Результати обчислення напружень з урахуванням сумісної дії внутрішнього тиску та згинального моменту за формулою 2.28 наведені у Таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. Результати розрахунку напружень у стінці ТОТ при НУЕ в залежності від ступеню потоншення під дією внутрішнього тиску та згинального моменту

Ступінь потоншення	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження σ_r^d (МПа) по (2.28)	Границя міцності R_m^T (МПа)
20%	177	70,421	412
30%	177	93,864	412
40%	177	111,151	412
50%	177	142,046	412
60%	177	194,854	412
70%	177	275,373	412
80%	177	673,834	412

З таблиці 2.7 слідує, що при визначенні розрахункових напружень з урахуванням сумісної дії двох факторів цілісність ТОТ буде зберігатися до ситуації, при якій потоншення стінки складе 70% від її проектної товщини.

Проведений вище чисельний аналіз по визначеню допустимо мінімальної товщини ТОТ згідно з методикою [155], вказує на те, що використання лінійних консервативних методів може привести до небажаних результатів. Більш точний аналіз неізотермічного пружнопластичного деформування ТОТ бажано провести згідно теорій, викладених в працях [185-188].

Нижче наведено рівняння задачі термопластичності тонких оболонок обертання змінної товщини з довільною формою меридіана при дії віссиметричних силових і теплових навантажень, деформація кручення відсутня [185].

$$\frac{drN_s}{ds} + \frac{r}{R_s} - N_\varphi \cos\theta + rq_s = 0;$$

$$\frac{drQ_s}{ds} - \frac{r}{R_s} N_s - N_\varphi \sin\theta + rq_s = 0;$$

$$\frac{drM_s}{ds} - rQ_s - M_\varphi \cos\theta + rm_s = 0;$$

$$\varepsilon_s = \frac{u}{ds} + \frac{w}{R_s};$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{u}{r_0} \cos\theta + \frac{w}{r_0} \sin\theta;$$

$$\chi_s = \frac{d}{ds} \left(\frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds} \right) = \frac{dv}{ds};$$

$$\chi_y = \frac{\cos\theta}{r_0} \left(\frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds} \right) = \frac{\cos\theta}{r_0} v;$$

$$v = \frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds};$$

$$N_s = C_1 \varepsilon_s + C_2 \varepsilon_\varphi + K_1 x_s + K_2 x_\varphi - N_T;$$

$$N_\varphi = C_2 \varepsilon_s + C_1 \varepsilon_\varphi + K_2 x_s + K_1 x_\varphi - N_T;$$

$$M_s = K_1 \varepsilon_s + K_2 \varepsilon_\varphi + D_1 x_s + D_2 x_\varphi - M_T; \quad 2.29$$

$$M_\varphi = K_2 \varepsilon_s + K_1 \varepsilon_\varphi + D_2 x_s + D_1 x_\varphi - M_T;$$

$$C_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^*}{1-v^{*2}} d\zeta; \quad C_2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{v^* E^*}{1-v^{*2}} d\zeta;$$

$$K_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^* \zeta}{1-v^{*2}} d\zeta; K_2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{v^* E^*}{1-v^{*2}} \zeta^2 d\zeta;$$

$$D_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^* \zeta^2}{1-v^{*2}} d\zeta; D_2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{v^* E^*}{1-v^{*2}} \zeta^2 d\zeta;$$

$$N_T = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^*}{1-\nu^*{}^2} \varepsilon_T d\zeta; \quad M_T = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \frac{E^*}{1-\nu^*{}^2} \varepsilon_T \zeta d\zeta$$

Для введення в розрахунок пружно - пластичної деформації спочатку слід задати діаграму деформування матеріалу.

Згідно з відомостями [146] з метою застосування в ANSYS діаграми деформування матеріалу ТОТ в пружно-пластичній області, може бути застосовано декілька підходів до її побудови. Для її застосування в ANSYS діаграма має бути побудована в істинних напруженнях і деформаціях і, більш того, в координатах «інтенсивність напруження σ_i – інтенсивність деформацій ε_i ». Це ϵ , так званою, узагальненою діаграмою деформування, яка вважається справедливою для будь-яких напружених станів у точці (у якій головні напруження $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

В ANSYS інтенсивність напружень називається еквівалентним напруженням за Мізесом і розраховується як:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad 2.30$$

При цьому інтенсивність деформацій розраховується таким чином:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad 2.31$$

Самим коректним і адекватним є застосування в розрахунку реальної, експериментально отриманої, діаграми деформування, але отримання такої діаграми не завжди є можливим, тому оптимальним у такій ситуації є її апроксимація.

Наприклад, можна скористатись білінійною наближеною діаграмою згідно з формулами:

$$\sigma = E\varepsilon \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_T; \sigma = \sigma_T + E_T(\varepsilon - \varepsilon_T) \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_T \quad 2.32$$

де $\sigma_T = E\varepsilon_T$ визначає деформацію ε_T на границі плинності σ_T , а E_T – модуль зміщення у пружній області $0 \leq E_T \leq E$.

Можна також скористатись полігональною апроксимацією діаграми деформування за координатами окремих точок діаграми. Для цього вводяться відносні координати $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_T}$, $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_T}$. Тоді пружна частина діаграми буде відповідати $\bar{\sigma} = \bar{\varepsilon}$. В інтервалі деформацій $\bar{\varepsilon}_n \leq \bar{\varepsilon} \leq \bar{\varepsilon}_{n+1}$ криву деформування може бути записано наступним чином:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_n + \frac{\bar{\sigma}_{n+1} - \bar{\sigma}_n}{\bar{\varepsilon}_{n+1} - \bar{\varepsilon}_n} (\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_n) \quad 2.33$$

Але найбільш близьку відповідність між аналітичними і експериментальними даними дає степенева апроксимація діаграми деформування, що приведена на Рис. 2.23.

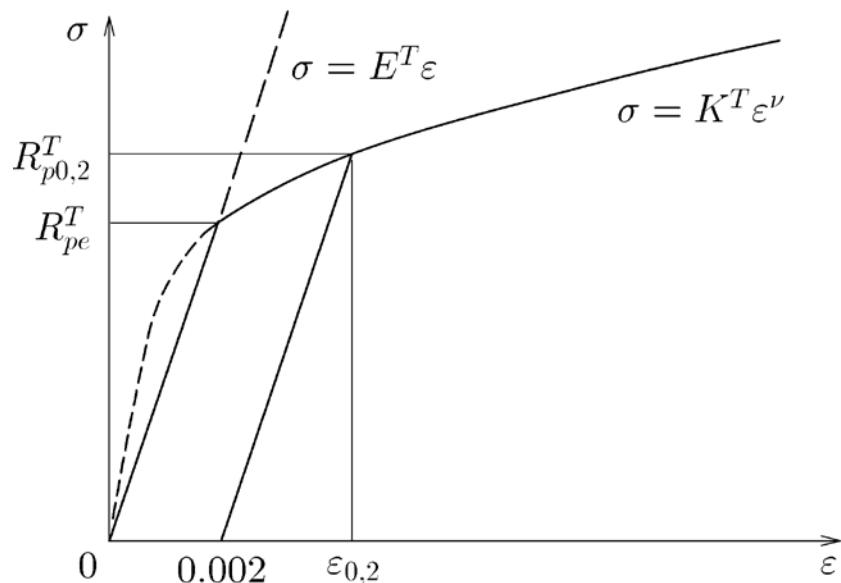


Рис. 2.23 Степенева апроксимація діаграми деформування

Введення в розрахунок пластичних деформацій [146] базується на наступних співвідношеннях:

$$\sigma = \begin{cases} E^T \varepsilon, & \sigma < R_{pe}^T, \\ K^T \varepsilon^\nu, & \sigma > R_{pe}^T, \end{cases} \quad 2.34$$

Із умови безперервності у точці переходу від лінійної до степеневої ділянки отримуємо $R_{pe}^T = K^T \varepsilon^{\nu}$ або

$$K^T = \frac{R_{pe}^T}{\varepsilon_{pe}^\nu} \quad 2.35$$

де:

$$\varepsilon_{pe} = \frac{R_{pe}^T}{E^T} \quad 2.36$$

R_{pe}^T - границя пропорційності при заданій температурі;

K^T – модуль зміщення при заданій температурі;

ν - показник зміщення;

E^T – модуль пружності при заданій температурі.

Показник зміщення розраховується за даними [152]

$$R_{pe}^T = \left[\frac{R_{p0,2}^T}{(R_{p0,2}^T + 0,002E^T)^\nu} \right]^{\frac{1}{1-\nu}} \quad 2.37$$

Показник зміщення матеріалу [152]:

$$\nu = \frac{0,73 \lg \left[\left(1 + 0,014 Z^T \right) R_m^T / R_{p0,2}^T \right]}{\lg \left[\frac{-2,3 E^T \lg \left(1 - Z^T / 100 \right)}{R_{p0,2}^T + 0,002 E^T} \right]} \quad 2.38$$

Для побудови пружно-пластичної діаграми степеневої апроксимації для матеріалу ТОТ (08Х18Н10Т) застосовувались параметри, наведені у Таблиці 2.4

Таблиця 2.4 Параметри для побудови діаграми степеневої апроксимації відносно температур 20-350°C

08Х18Н10Т		Температура							
		20	50	100	150	200	250	300	350
Границя міцності	R_m^T , МПа	10	471	461	441	421	421	412	412
Границя плинності	$R_{p0,2}^T$, МПа	216	206	206	196	187	187	177	177
Відносне подовження	A^T , %	35	32	30	28	27	26	26	26
Відносне звуження	Z^T , %	55	55	55	54	54	53	52	51
Температурний коефіцієнт	α , $\text{мкК} \cdot 1$		16,4	16,6	16,8	17	17,2	17,4	17,6
Модуль пружності	E^T , ГПа	205	202	200	195	190	185	180	175
Границя пропорційності	R_{pe}^T , МПа	167	163	163	154	147	147	137	138
Показник зміцнення	ν	0,18	0,183	0,180	0,181	0,180	0,181	0,185	0,185
Модуль зміцнення	K^T	48	47	49	46	44	44	40	40
	K , МПа	640	596	586	559	533	533	517	517

Степенева апроксимація діаграми деформування для введення в розрахунок пластичних деформацій для сталі 08Х18Н10Т, отримана за вказаним вище підходом представлена на Рис. 2.24.

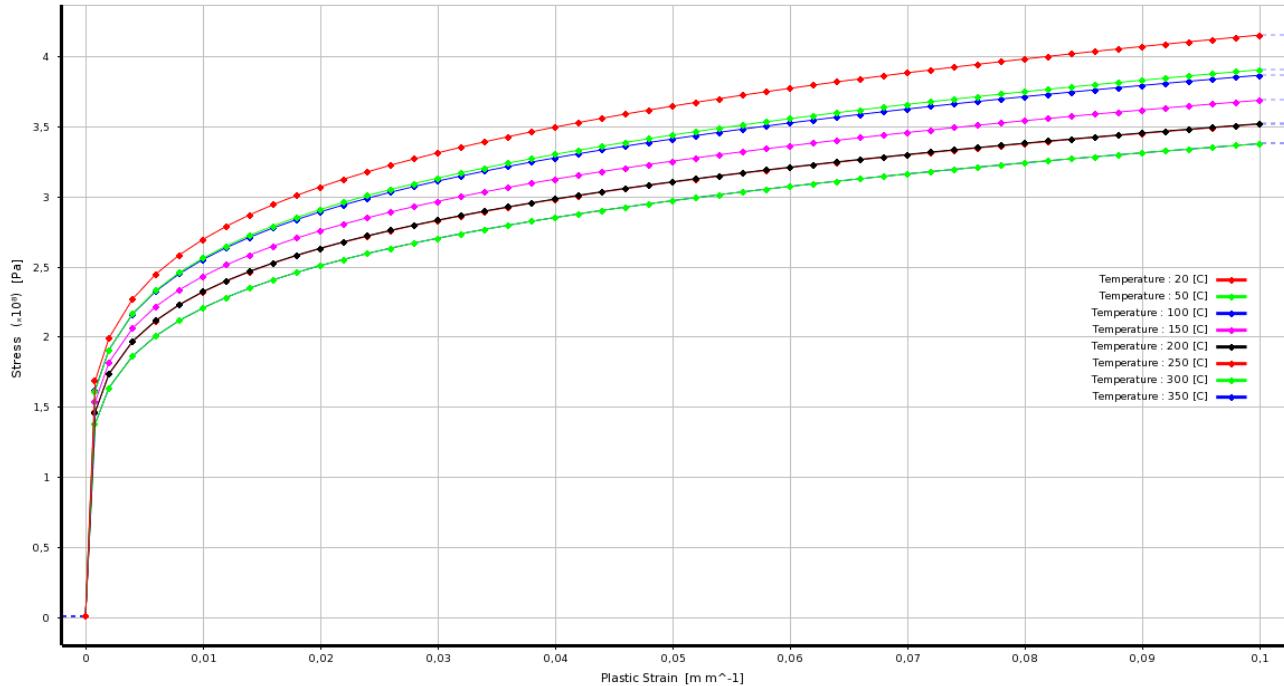


Рис. 2.24 Діаграма деформування для виконання пружно-пластичного розрахунку
(для сталі 08Х18Н10Т)

Наведені вище дані пружно-пластичної поведінки матеріалу [152, 156] використані в моделі при розрахунку НДС трубчатих елементів ПГ при аварійних ситуаціях

З урахуванням зазначеного підходу та з використанням програмного засобу ANSYS проведені ітераційні розрахунки з метою визначення мінімально допустимого потоншення стінки у прямій ділянці та у гині (розрахунки проведені у пружній та пружно-пластичній постановці).

Дефект реалізовано у вигляді локального потоншення товщини стінки загального вигляду (див. Рис. 2.12). Дефект постулюється у прямій ділянці та у гині, як у місці локалізації максимальних напружень з урахуванням особливостей навантаження, обумовлених овалізацією. У розрахунку прийняті навантаження за нормальних умов експлуатації, тобто:

$P = (17,64 \text{ MPa} - 7,84 \text{ MPa}) = 9,8 \text{ MPa}$ (внутрішній тиск при НУЕ прийнято як різницю між тисками 1-го і 2-го контурів);

$T = 350^\circ\text{C}$ (температура поверхні ТОТ (температура 1-го контуру)).

Результати розрахунку в ANSYS напружені для прямої ділянки ТОТ згідно з рівнянням (2.29).

Завдано дефект загального вигляду із довжиною 40 мм (див. Рис. 2.18) із різним ступенем потоншення (Рис. 2.19 «а»), «б») від 20% до 80%. Застосовано підхід субмоделінга. Розрахунок виконано у пружній та пружно-пластичній постановці.

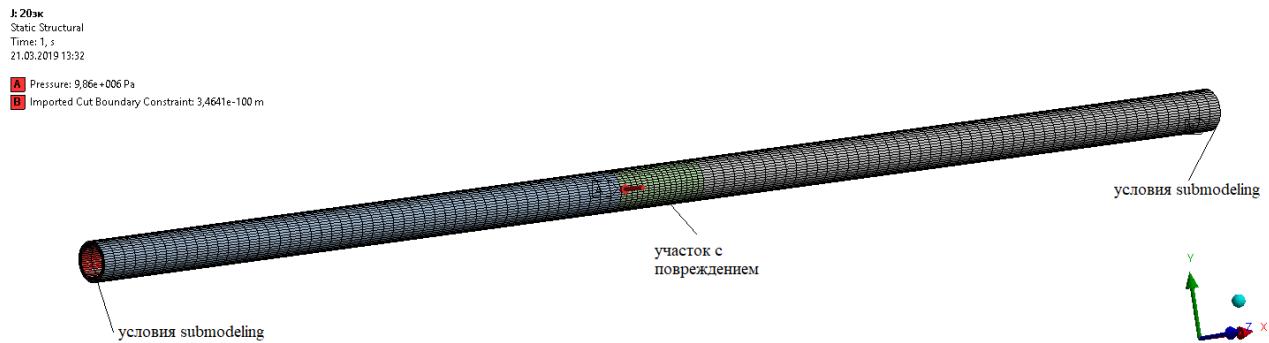


Рис. 2.18. Потоншення загального вигляду на прямій ділянці

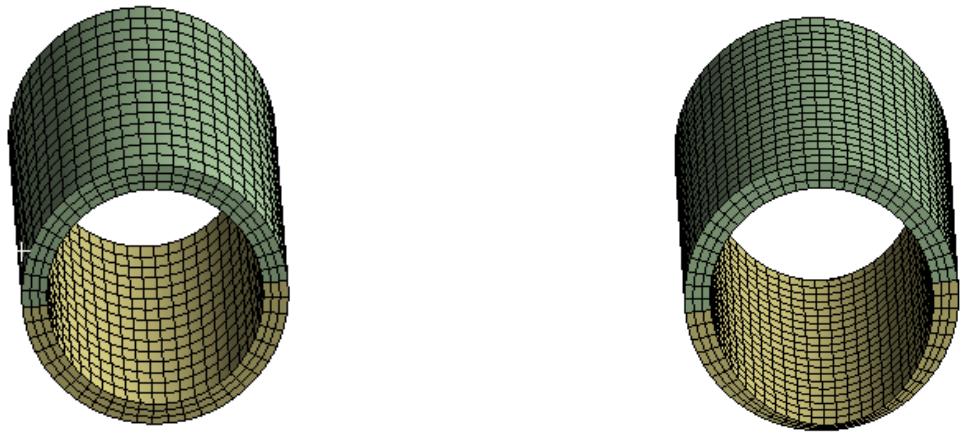


Рис. 2.19. Границі потоншення

Результати розрахунку для потоншення 20% і 80% приведені на Рис. 2.20 та 2.21 відповідно.

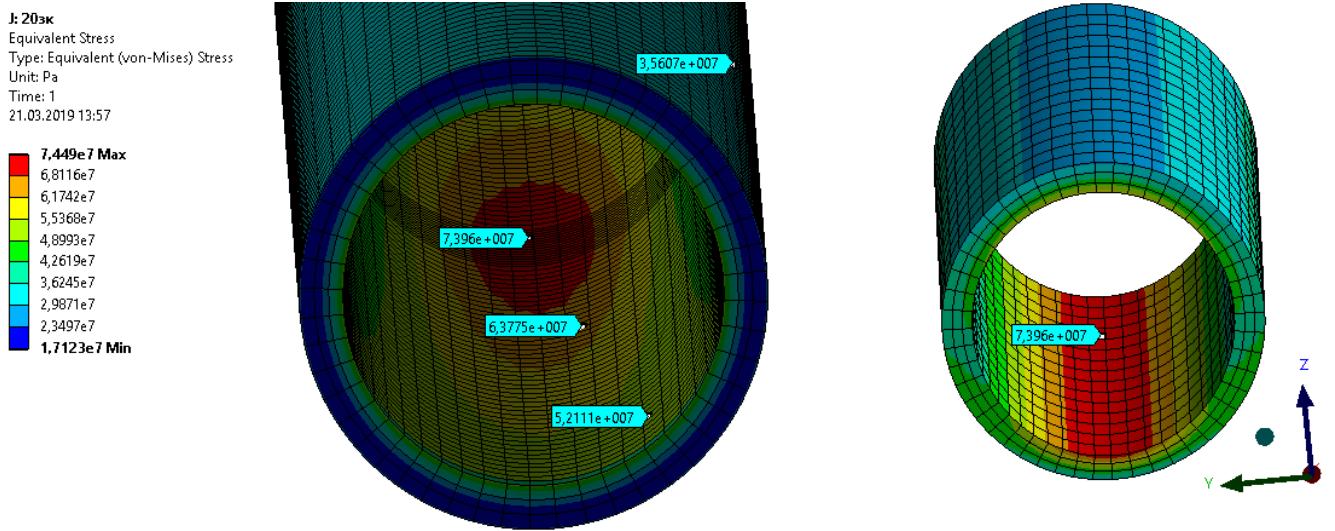


Рис. 2.20 Напруження на внутрішній стінці труби для потоншення 20%

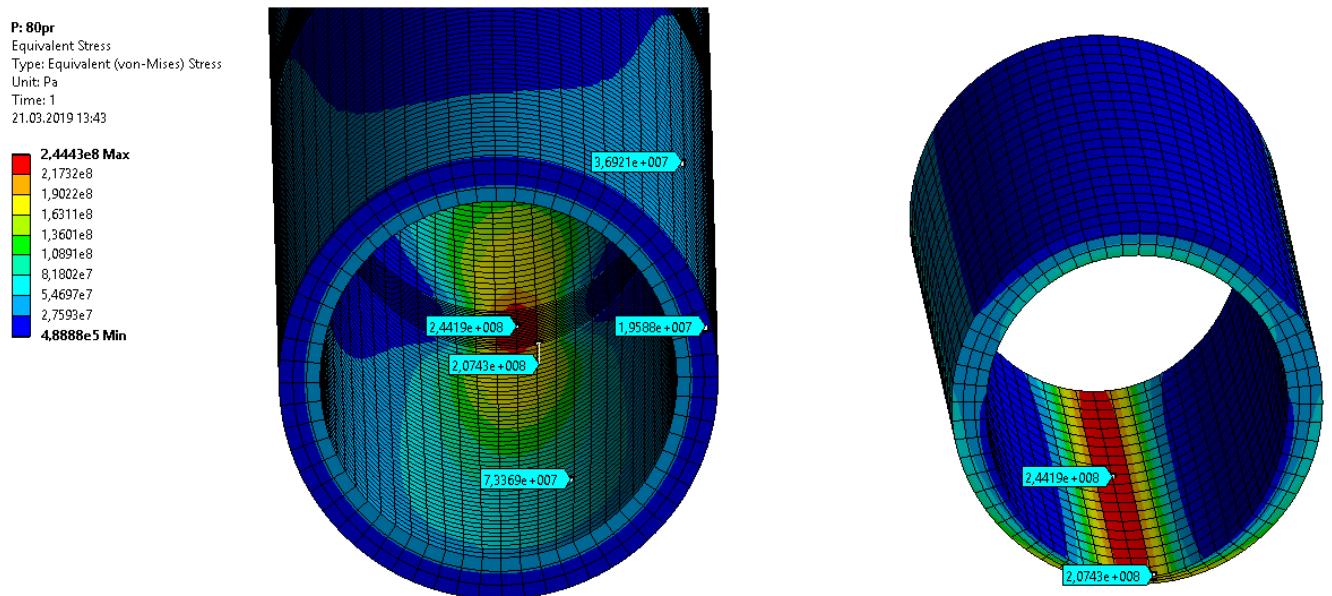


Рис. 2.21 Напруження на внутрішній стінці труби для потоншення 80%

Зведені результати розрахунку (для порівняння) впливу потоншення на напружений стан наведено у Таблиці 2.8 та на Рис. 2.22

Таблиця 2.8. Зведені результати розрахунку впливу потоншення на напруженій стан ТОТ при НУЕ (пряма ділянка)

Ступінь потоншення	Залишкова товщина стінки ТОТ (мм)	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження (σ) ₁ ^H (МПа) по (2.23)	Розрахункове напруження (σ) ₁ ^H (МПа) по (2.24) зовн. поверхня	Розрахункове напруження (σ) ₁ ^H (МПа) по (2.24) вн. поверхня	Розрахункове напруження (σ) ₁ (МПа) ANSYS Пружна постановка	Розрахункове напруження (σ) ₁ (МПа) ANSYS Пружно-пластична постановка	Границя міцності R_m^T (МПа)
20%	1,20	177	60,43	56,592	65,46	74	74	412
30%	1,05	177	69,77	65,376	75,51	90	90	412
40%	0,90	177	82,21	77,089	88,91	119	111	412
50%	0,75	177	99,63	93,63	107,67	141	139	412
60%	0,6	177	125,77	118,08	135,81	180	180	412
70%	0,45	177	169,32	159,08	182,72	199	197	412
80%	0,3	177	256,43	241,07	276,53	244	231	412

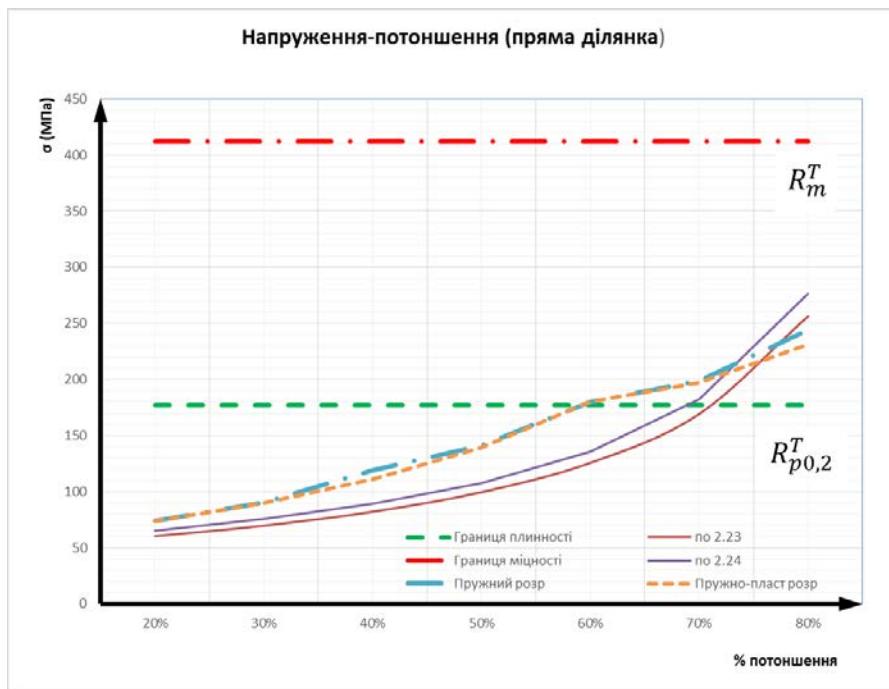


Рис. 2.22 Залежність напруженого стану від ступеню потоншення

Результати розрахунків напружень для прямої ділянки ТОТ за наявності потоншення від 20% до 80% свідчать про таке:

1) Напруження, що розраховані за емпіричними формулами методики [155] є менш консервативними на 10-40% за напруження, розраховані із застосуванням ANSYS. Це обумовлено тим, що за формулами методики [155] температура не враховується, а в ANSYS цей фактор враховано.

2) Для прямої ділянки трубопроводу цілісність трубки ТОТ в режимі НУЕ зберігається навіть при 80% втрати матеріалу.

Результати розрахунку в ANSYS напружень для гину ТОТ, згідно рівнянь (2.29), радіус гину $B=60$ мм

Потоншення завдано у вигляді дефекту загального вигляду із довжиною 40 мм (див. Рис. 2.23) із різним ступенем потоншення (Рис. 2.24 «а»-«г») від 20% до 80%. Застосовано підхід субмоделінга. Розрахунок виконано у пружній та пружнопластичній постановці

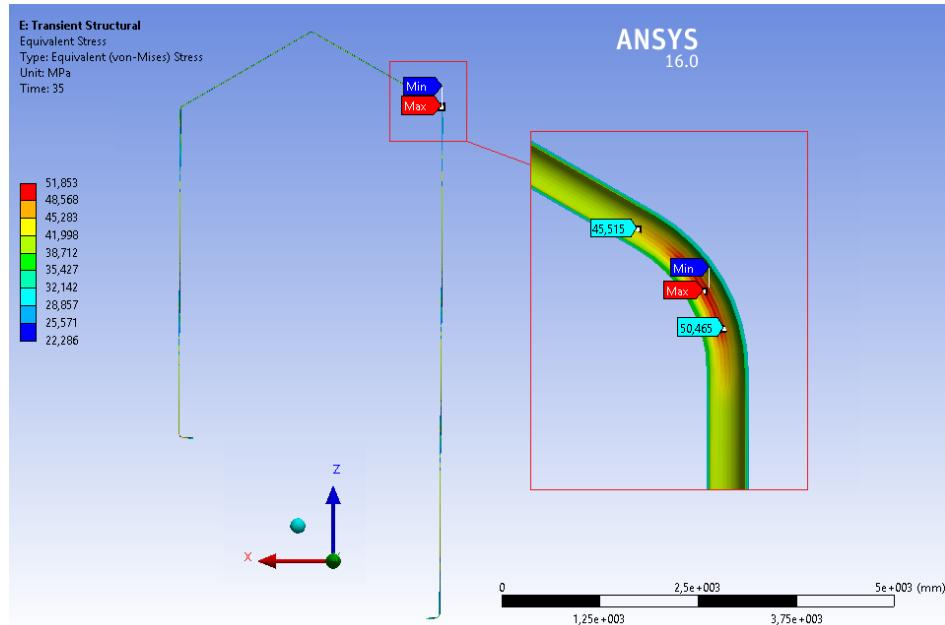
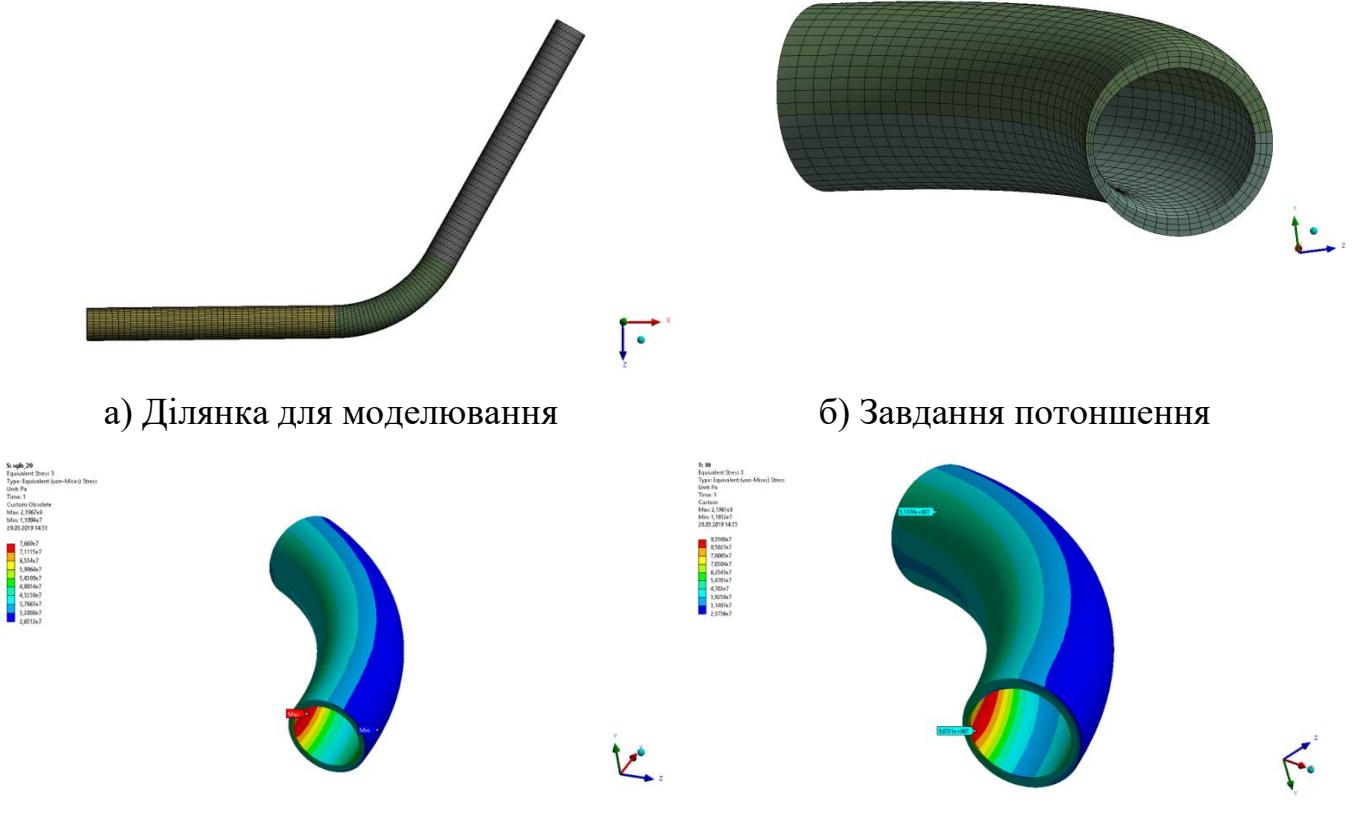


Рис. 2.23 Потоншення загального вигляду у гині



в) Напруження при потоншенні 20%

г) Напруження при потоншенні 80%

Рис. 2.24 Завдання потоншення різного ступеню

Зведені результати розрахунку (для порівняння) впливу потоншення на напружений стан наведено у Таблиці 2.9.

Таблиця 2.9. Зведені результати розрахунку впливу потоншення на напружений стан ТОТ при НУЕ (ділянка гин)

Ступінь потоншення	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження σ_r^d (МПа) по (2.28)	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

Результати розрахунків напружень для гину ділянки ТОТ за наявності потоншення від 20% до 80% свідчать про таке:

1) Напруження, що розраховані за емпіричними формулами методики [155] для гину є менш консервативними на 5-10% за напруження, розраховані із застосуванням ANSYS. Це обумовлено тим, що за формулами методики [155] температура не враховується, а в ANSYS цей фактор враховано.

2) Для ділянки гину трубопроводу цілісність трубки ТОТ в режимі НУЕ зберігається навіть при 70% втрати матеріалу.

Досконалій аналіз напружень в ТОТ складається з наступних частин:

- вибір системи диференційних рівнянь, які описують пружно-пластичний стан оболонок обертання змінної товщини з довільною формою меридіана при дії віссиметричних силових і теплових навантажень;
- визначення діаграми деформування матеріалу трубок ТОТ в пружно-пластичній області;
- збір висхідних даних з визначенням статичних, температурних навантажень, включаючи деякі специфічні локальні навантаження і джерела їх походження;
- визначення граничних умов, які можуть змінюватися з часом, компоновкою і трасуванням ТОТ, технологією виготовлення і монтажу і умовами експлуатації ПГ;
- визначення і оцінка НДС ТОТ в дефектних перетинах.

Висновки по розділу 2

У цьому розділі для достовірної оцінки міцності ділянки трубопроводу з локальними потоншеннями стінки розроблено методику, 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. Підтвердження того, що саме поверхня еліпсоїду є найбільш консервативним варіантом моделювання потоншення, отримано також експериментально (роздільність експериментальних даних і результатів отриманих з допомогою ПЗ ДИПРОС [169] не перевищує 5%. В експериментах використовувався зразок для дослідження напруженно-деформованого стану трубопроводів з локальним потоншенням [168].

Особлива увага приділена впливу дефектів ТОТ у вигляді тріщини. Умову міцності ТОТ в цьому випадку можна записати як: K_{IC} – граничний КІН (в'язкість руйнування), який являє собою механічну характеристику матеріалу, що характеризує його опір зростанню тріщини при крихкому руйнуванні. Ця величина визначається експериментально. КІН (K_I) згідно з різними джерелами може визначатись різними методами. ТОТ ПГ не схильні до нейтронного опромінення і, приймаючи до уваги вказані вище фактори, в якості критерію прийнято допустиме значення КІН: $[K_I]=55 \text{ МПа} * \text{м}^{1/2}$.

Відповідно до ПНАЕ Г-7-002-86 [1531] коефіцієнт інтенсивності напружень, для ТОТ, які навантажені внутрішнім тиском і температурним впливом для прямолінійної ділянки формула (2.19) дорівнює $1,713 \text{ МПа} \text{ м}^{1/2}$. Результати розрахунку трубки за умови наявності в неї тріщин (на внутрішній та зовнішній поверхні) свідчать про те, що для тріщини глибиною 25% товщини стінки, максимальне значення КІН на внутрішній і зовнішній поверхнях складає

$$K_{I\max} = 1,71 \text{ МПа} * \text{м}^{1/2} < [K_I]=55 \text{ МПа} * \text{м}^{1/2}$$

Визначення впливу ступеню небезпеки дефектів на міцність трубопроводів присвячено багато наукових робіт і методик. Проведений чисельний аналіз по визначенням допустимо мінімального потоншення стінки ТОТ згідно Методики [153], вказує на те, що використання лінійних консервативних методів без врахування температурних напружень може привести до небажаних результатів. Так, коли не визначається глобальний НДС ТОТ, номінальне розрахункове напруження для прямої ТОТ і в зоні згину не перевищує границі плинності матеріалу ТОТ при 60%

потоншення стінки ТОТ. У випадку, коли враховується дія внутрішнього тиску і пластичного послаблення від дії згинального моменту, номінальне розрахункове напруження в зоні згину перевищує границі плинності матеріалу ТОТ при 50% зносу стінки ТОТ.

Таким чином, є обґрунтування стверджувати, що досконалій аналіз напружень в ТОТ в зоні дефекту (потоншення) бажано визначати з допомогою теорії пружнопластичності. Для цього вибрана система диференційних рівнянь, які описують пружнопластичний стан оболонок обертання змінної товщини з довільною формою меридіана при дії віссиметричних силових і теплових навантажень. Визначена діаграма деформування матеріалу трубок ТОТ в пружнопластичній області. З урахуванням зазначеного підходу та з використанням програмного засобу ANSYS проведені ітераційні розрахунки НДС ТОТ з метою визначення мінімально допустимого потоншення стінки ТОТ на прямій ділянці і в області гину за нормальних умов експлуатації (розрахунки проведені у пружній та пружнопластичній постановці).

Результати розрахунків напружень для прямої ділянки та гину ТОТ за наявності потоншення від 20% до 80% свідчать про таке:

- 1) Напруження, що розраховані за емпіричними формулами методики [155] для прямої ділянки і гину є менш консервативними на 5-40% за напруження, розраховані із застосуванням ANSYS. Це обумовлено тим, що за формулами методики [155] температура не враховується, а в ANSYS цей фактор враховано.
- 2) Для **прямої** ділянки трубопроводу цілісність трубки ТОТ за нормальних умов експлуатації зберігається при 80% втрати матеріалу
- 3) Для ділянки **гину** трубопроводу цілісність трубки ТОТ в режимі НУЕ зберігається при 70% втрати матеріалу.

Узагальнюючи наведене вище зроблено висновок про те, що при майже однакових параметрах втрати металу за рахунок потоншення або за наявності тріщини, більш значимий вплив на НДС надають дефекти у вигляді потоншень.

РОЗДІЛ 3. РОЗТАШУВАННЯ І ВПЛИВ ШЛАМУ НА ГРАНИЧНІ УМОВИ І НДС ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ

3.1 Визначення параметрів та характеристик шlamу

Як вже зазначено вище (див. Розділ 1 та 2) ПГ працює у складних експлуатаційних умовах, які впливають на характер пошкоджень елементів ПГ у наслідок деградації. Згідно з даними [11] і досвідом експлуатації [175], основними факторами, які впливають на утворення дефектів ТОТ є такі:

- надмірні відкладення на трубах;
- концентрація корозійно-активних сумішей у воді ПГ.

Пошкодження ТОТ від корозійних впливів води другого контуру є одним із впливовіших факторів. Вони утворюються при сумісній дії механічних напружень, корозійно-активних елементів (хлор-іонів) та окиснювача (кисня або окису міді). Основним фактором, що впливає на працездатність трубчатки і появу відкладення, є водно-хімічний режим.

Механізм утворення відкладення на трубах, згідно з даними [11], [175] може бути описаний таким чином:

- надходження з живильною водою іонів, розчинених молекул і мелкодисперсних частинок окиснів заліза і міді (гідратованих і дегідратованих);
- осадження міді, що потрапляє у воду парогенератора та мідь вміщуючих елементів обладнання другого контуру на поверхні ТОТ;
- концентрування хлор-іонів внаслідок доупарювання води у вже сформованих відкладеннях.

Таким чином, згідно [98 – 104, 175] відкладення або «шlam», утворені на трубках ПГ, являють собою по суті (Рис. 3.1) налипання мілких частинок окисів заліза і міді, склеєних між собою сольовими домішками (іони натрія, хлорід іони, сульфат іони), які з часом збільшуються в об'ємі і за ступенем налипання на трубки ПГ (якщо не проводити хімічне промивання).

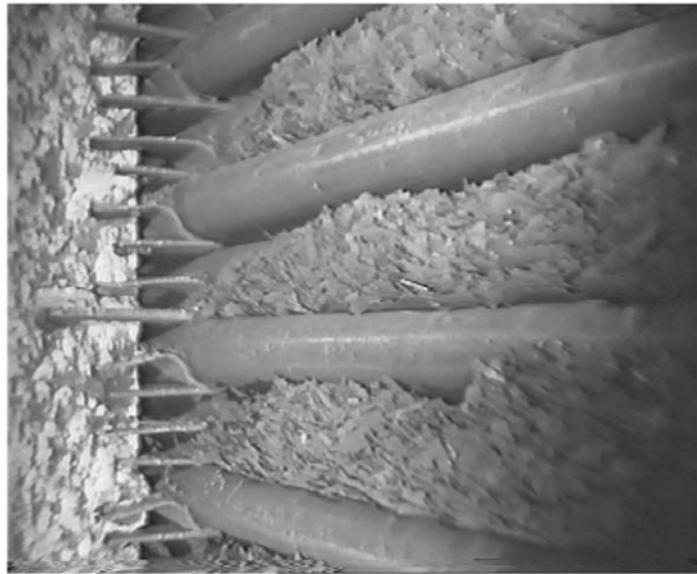


Рис. 3.1 Локальна зона скучення шламу у парогенераторі

За даними звіту про стан ПГ на АЕС України [175] динаміка середньої величини концентрації окисів заліза, міді і сольових домішок складає (в залежності від енергоблоку і року експлуатації):

- для окисів заліза - 3,1-84,97 мкг/дм³;
- для окисів міді - 1,0-3,5 мкг/дм³;
- для іонів натрія - 10-80 мкг/дм³;
- для хлорид-іонів - 20-50 мкг/дм³;
- для сульфат-іонів - 20-120 мкг/дм³;

За даними [176] відкладення характеризуються наступними параметрами:

- окис заліза (Fe_3O_4) з масовою долею близько 70%;
- окис міді (Cu_2O , CuO) з масовою долею близько 29%;
- іони натрія, хлорид-іони, сульфат-іони з масовою долею близько 1%.

Солі (іони натрія, хлорид-іони, сульфат-іони) утворюються та концентруються на нижній поверхні відкладень, тобто безпосередньо на поверхні трубки і в подальшому призводять до утворення виразок і тріщин на зовнішній поверхні трубок.

Узагальнюючи викладене вище, можна охарактеризувати налипання/шлам, як «металеву стружку», що налипла до теплообмінних трубок. Щільність складових шламу складає:

$$\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - \text{щільність окису заліза } (\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4}=5,2 \text{ г/см}^3)$$

$$\rho_{\text{Cu}_2\text{O}} - \text{щільність окису міді } (\rho_{\text{Cu}_2\text{O}}=6,3 \text{ г/см}^3)$$

$$\psi - \text{пористість відкладень } (\psi=0,3).$$

Особливий інтерес представляють ділянки, розташовані у другій напівпетлі ПГ в зоні максимального скупчення шламових відкладень між 2-ю і 4-ю дистанціонуючими гратами від гарячого колектора і далі до холодного колектора, де розташований "сольовий" відсік (див. Рис. 3.2). Причинами утворення зони максимального скупчення шламу між 2-ю і 4-ю гратами від гарячого колектора другої напівпетлі парогенераторів є наявність високих температурних напружень і низьких швидкостей циркуляції котлової води в цій зоні, низька ефективність виведення шламових відкладень через продування парогенераторів, високий корозійно-ерозійний знос обладнання другого контуру.

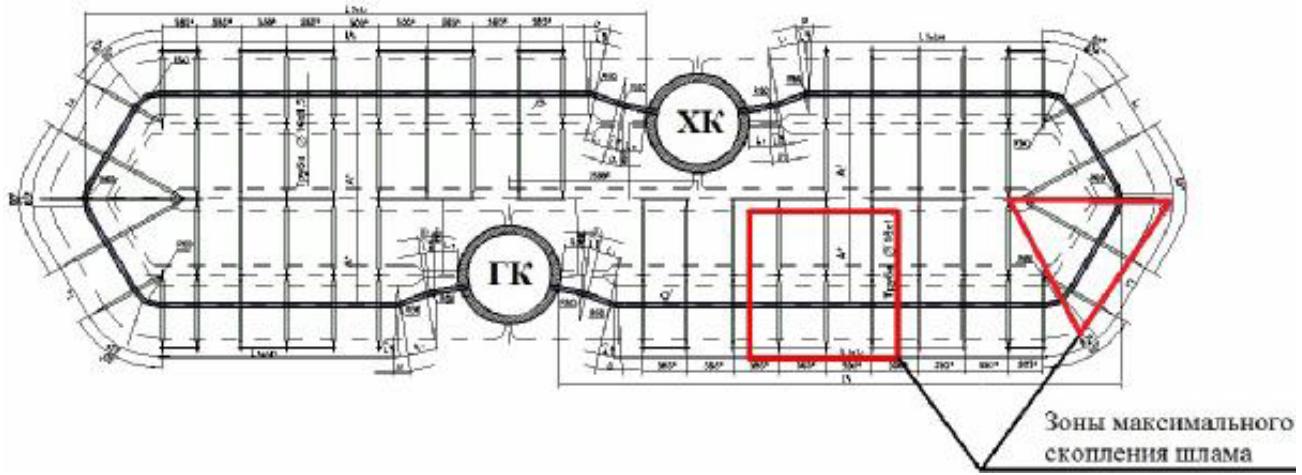
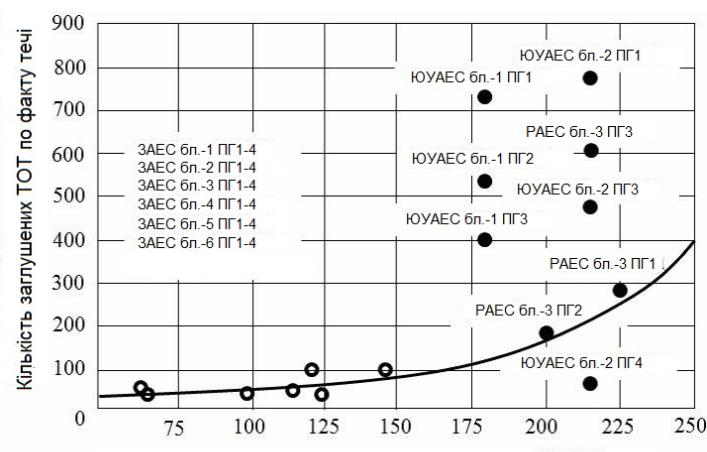


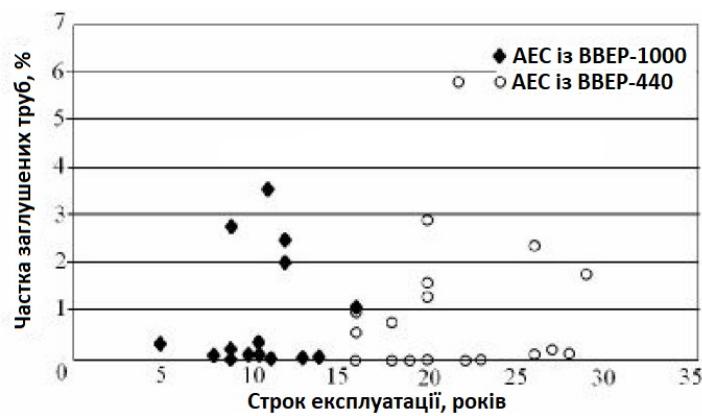
Рис. 3.2 Зони максимального скупчення шламу

Проведені дослідження [11, 154, 176], у тому числі металографічні, зразків ТОТ, що вирізані із замінених ПГ АЕС з ВВЕР-1000 свідчать про те, що як правило причиною пошкодження теплообмінних труб є недопустимий рівень забрудненості

відкладенням (локально до 1000...2000 г/м² при допустимому значенні 100...150 г/м²). За наявності такого відкладення на ТОТ питання може стояти лише у тому, наскільки довгим буде період до їх пошкодження. На Рис.3.3 а) представлена середня питома забрудненість ТОТ до моменту початку хімічного відмивання, г/м², а на Рис 3.3 б) залежність кількості заглушених ТОТ ПГ АЕС України від середньої розрахункової питомої забрудненості по довжині ТОТ.



а) Питома забрудненість ТОТ



б) Залежність кількості заглушених ТОТ від забрудненості по роках експлуатації

Рис. 3.3. Залежності заглушених труб від забрудненості ТОТ

На Рис. 3.3 введені такі позначення:

«о» – допустима величина питомої забрудненості ТОТ;

«•» – критична величина питомої забрудненості ТОТ;

«◆» - для АЕС з ВВЕР-1000;

«○» - для АЕС з ВВЕР-440;

«ЮУАЕС» – Южно-Українська АЕС;

«РАЕС» – Рівненська АЕС;

«ЗАЕС» - Запорізька АЕС.

Рис. 3.3 а) свідчить про те, що накопичення відкладення із середньою забрудненістю більш 150 г/м² призводить до пошкодження ТОТ ПГ і чим вище забрудненість, тим більша кількість заглушених труб на цьому ПГ. Цей факт дозволяє обґрунтовано вважати, що корінною причиною пошкодження ТОТ можуть бути умови експлуатації ПГ, а визначальним фактором недопустимий рівень питомої забрудненості відкладенням на ТОТ ПГ.

Процес накопичення шламу на ТОТ міняє їх товщину (втрата матеріалу), умови їх спирання і, відповідно, закладена в проекті можливість їх переміщення суттєво міняється, що приводить до непроектному закріпленню і утворення локальних зон з високим рівнем напружень, який в свою чергу, сумісно зі зменшенням товщини стінки може приводити до порушення цілісності ТОТ і, відповідно, до переміщування «брудного» і «чистого» теплоносія. Для визначення областей цих змін виконаний аналіз стану навколошнього середовища ТОТ і оцінка її впливу на процеси утворення локальних забруднень і осідання шламу на ТОТ (Рис. 3.2).

В процесі експлуатації ПГВ-1000М були виявлені різні випадки їх пошкодження. В період з 1986 по 1991 роки спостерігалось пошкодження металу холодних колекторів ПГВ-1000М в перемичках між отворами в перфорованій зоні. В період з 1997 по 2014 роки спостерігалось масове пошкодження ТОТ у другому півколі в зоні між першою і четвертою дистанціонуючими решітками від «гарячого» колектору (Рис.3.2). Всього на АЕС України змінено 30 ПГ, із них 18 – на ЮУАЕС, 12 – на ЗАЕС. Термін служби до заміни складав від 2– х до 13 років. Залежність долі заглушених ТОТ від терміну експлуатації представлена на Рис. 3.3 а).

Для визначення зон максимального накопичення шламу зібрани і опрацьовані статистичні дані про заглушені ТОТ 24 ПГ ЗАЕС в період з 1991 по 2010 рр. Особливий інтерес представляють ділянки, розташовані у другому півколі ПГ в зоні максимального скучення шламових відкладень між 2-ю і 4-ю дистанційними решітками від гарячого колектору і далі до холодного торця (див. Рис. 3.2). Причинами утворення зони максимального накопичення шламу між 2-ю та 4-ю решітками від «гарячого» колектору другого напівколо ПГ є наявність високих температурних напружень і низьких швидкостей циркуляції котлової води в цій зоні, низька ефективність виводу шламових відкладень.

Рис. 3.3 а) свідчить про те, що накопичення відкладення із середньою забрудненістю більш 150 г/м² призводить до пошкодження ТОТ ПГ і чим вище забрудненість, тим більша кількість заглушених труб на цьому ПГ. Цей факт дозволяє обґрунтовано вважати, що корінною причиною пошкодження ТОТ можуть бути умови експлуатації ПГ, а визначальним фактором недопустимий рівень питомої забрудненості відкладенням.

Механізм і причини розвитку корозійних процесів у ПГ схематично можна представити так:

- корозія і ерозія обладнання і трубопроводів призводять до надходження продуктів корозії заліза і міді із живильною водою у ПГ;

- у ПГ внаслідок випарювання води продукти корозії концентруються і відкладаються у першу чергу на поверхнях теплообміну (у складі відкладень ПГ продукти корозії заліза і міді складають близько 95-99%), як показано на Рис. 3.1, Рис. 3.4;

- у місцях відкладення та скучення шламу, у щілях і зазорах на теплообмінних поверхнях концентруються суміші (так званий процес хайд-аут), що призводить до прискореної корозії, утворенню виразок і початку розвитку таких дефектів, як тріщина, а також корозійному розтріскуванню під напруженням (як продемонстровано на Рис. 3.1, Рис. 3.4);

– аналогічні пошкодження виникають внаслідок гальванічної корозії контактної пари мідь-залізо, що виникає при відкладенні металічної міді на поверхнях ТОТ внаслідок недоліків ВХР і хімічних промивок ПГ (недостатнє відмивання від міді, малі швидкості дренування розчинів).

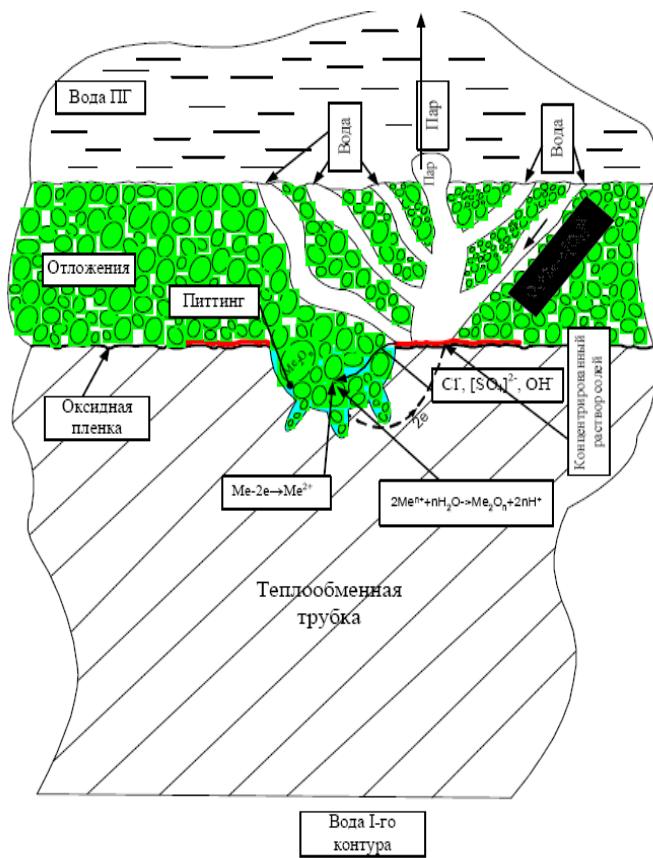
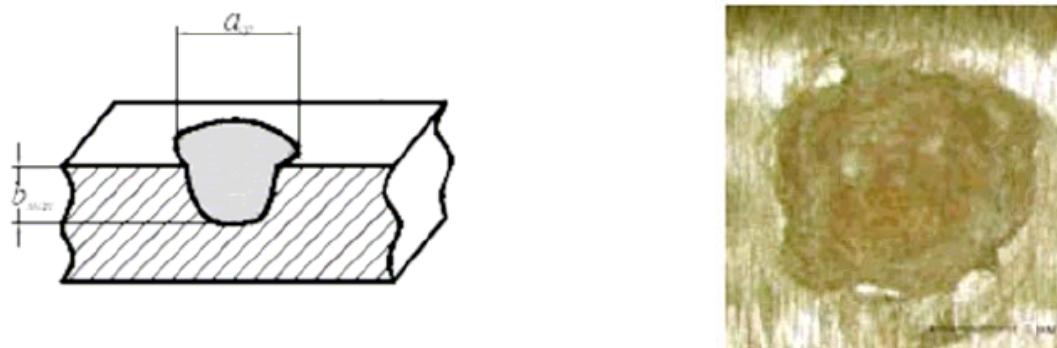
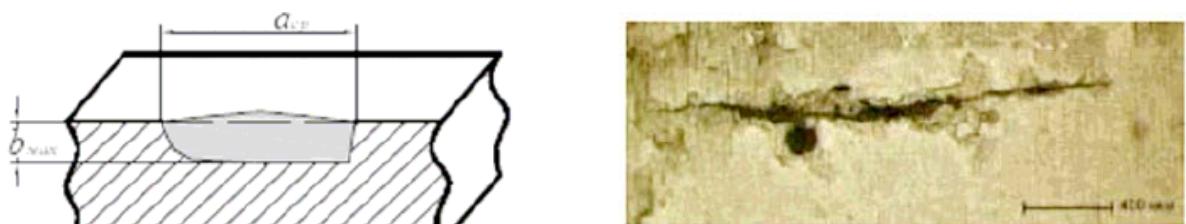


Рис. 3.4 Схематичне зображення шламового відкладення на ТОТ ПГ

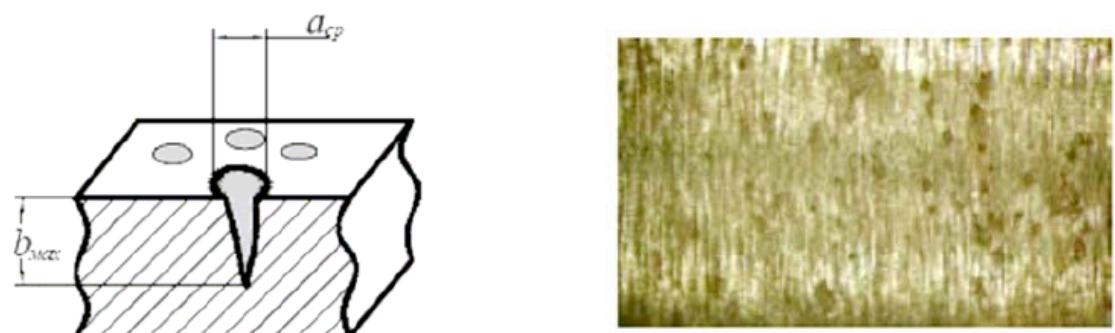
В окремих роботах, таких як [111, 137, 141] представлені результати металографічних досліджень вирізаних зразків ТОТ з реальними експлуатаційними дефектами. Ці зразки вирізані із різних зон ПГ, але дослідження показали, що, переважно, виявлені дефекти розташовані саме на ділянці від 2-ї до 4-ї дістанціануючої гратки (див. Рис. 3.2). Типи дефектів, які виявлені за результатами досліджень вирізаних трубок, представлені нижче на Рис. 3.5 («а» - «г»).



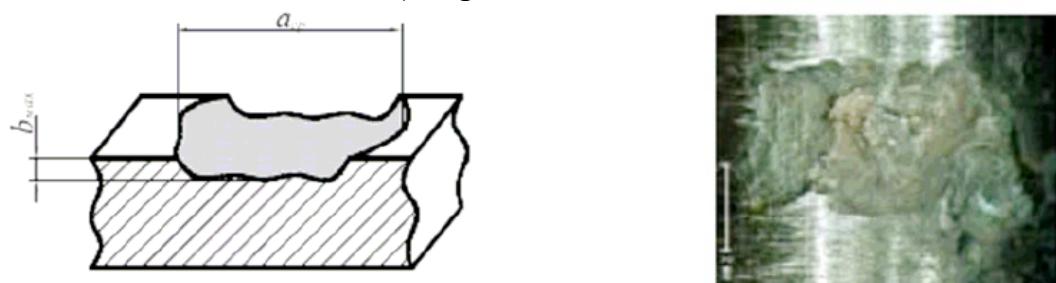
а) – корозійна виразка



б) - корозійна тріщина



в) корозійний пітінг



г) корозійна пляма

Рис. 3.5 – Схематичні і реальні зображення основних типів дефектів, отриманих за результатами досліджень вирізаних зразків

Дослідження [111, 178] також вказують на те, що у нижній зоні трубчатки ПГ основними типами пошкодження є такі:

- виразки (приблизно 55%);
- розтрави/плями (приблизно 25%);
- тріщини з розтріскуванням (приблизно 20%).

Крім того ці дефекти визначаються як поодинокі, так і у вигляді окремих сполучень (наприклад виразка із тріщиною тощо). Водночас всі виявлені в рамках досліджень [111, 178] дефекти притаманні зовнішній поверхні і практично не виявлені по відношенню до внутрішніх поверхонь трубок.

Результати досліджень [111, 178] вирізаних реальних зразків трубок ПГ підтверджують результати досліджень [154, 176, 177,] щодо негативного впливу відкладення/шламу на поверхні ТОТ з погляду того, що формуються умови, які можуть вплинути на цілісність трубчатки під дією екстремальних перепадів тиску та температури, що є характерними для умов протікання аварійних подій.

3.2 Визначення впливу шламу на НДС ТОТ ПГ

У розділі 3.1 проаналізовано чинники утворення, встановлено зони максимального скупчення відкладення/шламу у ПГ та визначено основні фактори, які можуть вплинути на НДС трубчатки. Нижче виконано чисельний аналіз та оцінка впливу цих факторів на НДС і розглянуті наступні випадки:

- аналіз НДС трубчатки в умовах зміни кінематичних та граничних умов (зміна умов обпирання через налипання відкладення навколо трубок і обмеження можливості їх вільного (проектного) переміщення);
- аналіз НДС трубчатки в умовах збільшеної маси трубки через налипання відкладення на трубки.

Нижче наведені результати аналізу впливу кожного окремого фактору та їх сполучення на НДС ТОТ.

3.2.1 Побудова та верифікація розрахункової моделі

На підставі аналізу проектної та експлуатаційної документації [179-183], у модулі Designmodeler, який входить до складу розрахункового комплексу ANSYS створено

геометричну модель 7 ліній теплообмінних трубок із фрагментами циліндричної частини «холодного» и «гарячого» колекторів.

Виходячи з умов симетрії «холодний» і «гарячий» колектори 1-го контуру змодельовані у вигляді напівкруглого сегменту перфорованої циліндричної частини колекторів висотою 40 мм. Колектори змодельовані з метою консервативного визначення впливу температурних розширень колектору на досліджувані лінії ТОТ.

Враховуючи віссиметрію конструкції і навантаження ТОТ використаємо рівняння задачі термопластичності тонких оболонок обертання змінної товщини з довільною формою меридіана (2.29) [185, 186] для визначення НДС ТОТ.

Для детального аналізу напружено-деформованого стану було обрано 3 лінії ТОТ зовнішнього U-образного пучка і 4 лінії ТОТ внутрішнього U-образного пучка, а саме:

- крайні зовнішні трубки зовнішнього U-образного пучка;
- крайні внутрішні трубки зовнішнього U-образного пучка;
- крайні зовнішні трубки внутрішнього U-образного пучка;
- крайні внутрішні трубки внутрішнього U-образного пучка;
- трубки, що виходять радіально під кутом 12° від осі колектору в поздовжньому напрямку ПГ обох U-образних пучків;
- одна трубка, що виходить радіально під кутом 40° від осі колектору в поздовжньому напрямку ПГ внутрішнього U-образного пучка.

Вибір даних трубок обумовлений такими факторами:

- геометрична форма (вибрані лінії охоплюють всі різновиди форм ТОТ по трасуванню);
- ТОТ, з максимально великими відстанями між опорними елементами.

На Рис. 3.6 і Рис. 3.7 наведені схеми для побудови розрахункової моделі 7 теплообмінних трубок парогенератора ПГВ-1000М.

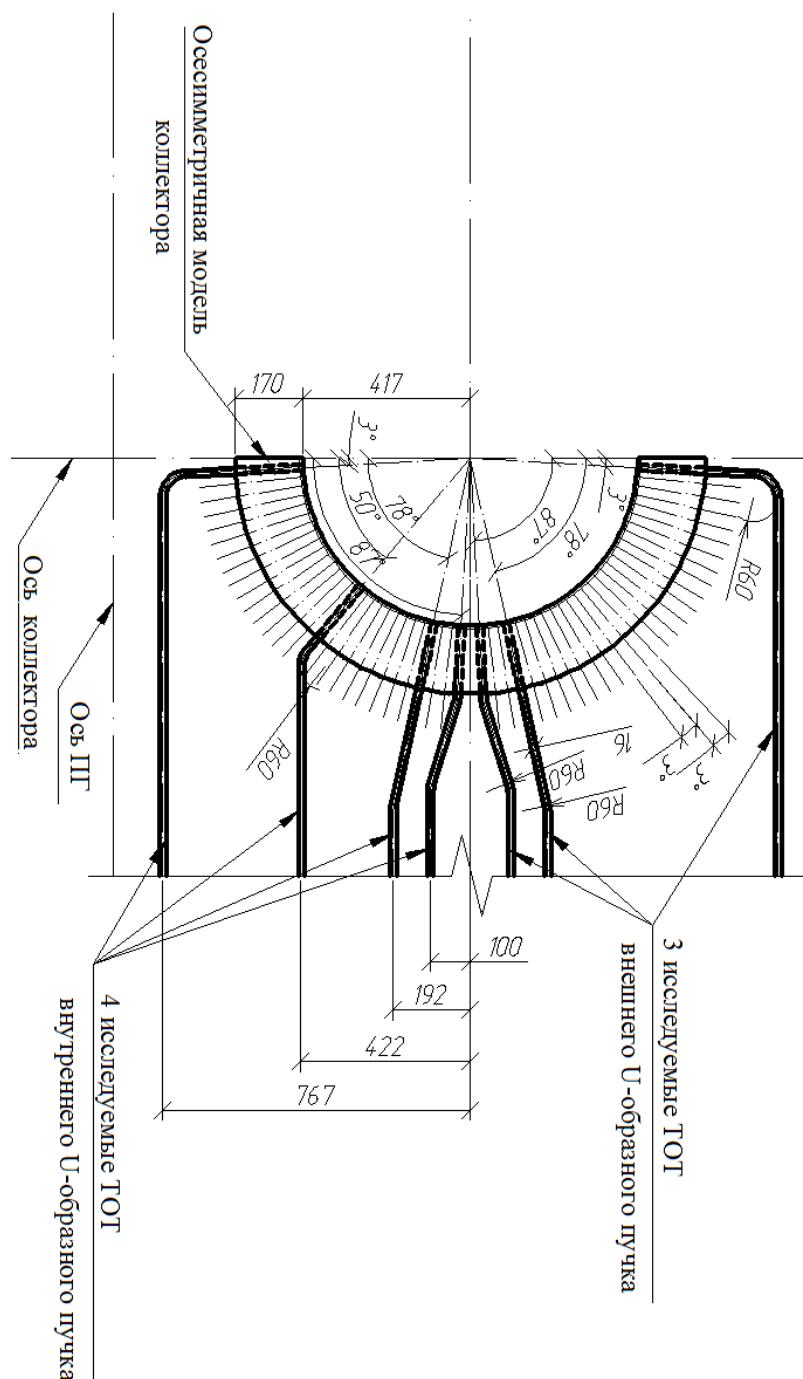


Рис. 3.6 Схема радіального розташування обраних ліній ТОТ для оцінки НДС (узол з'єднання з «гарячим колектором» парогенератора ПГВ-1000М)

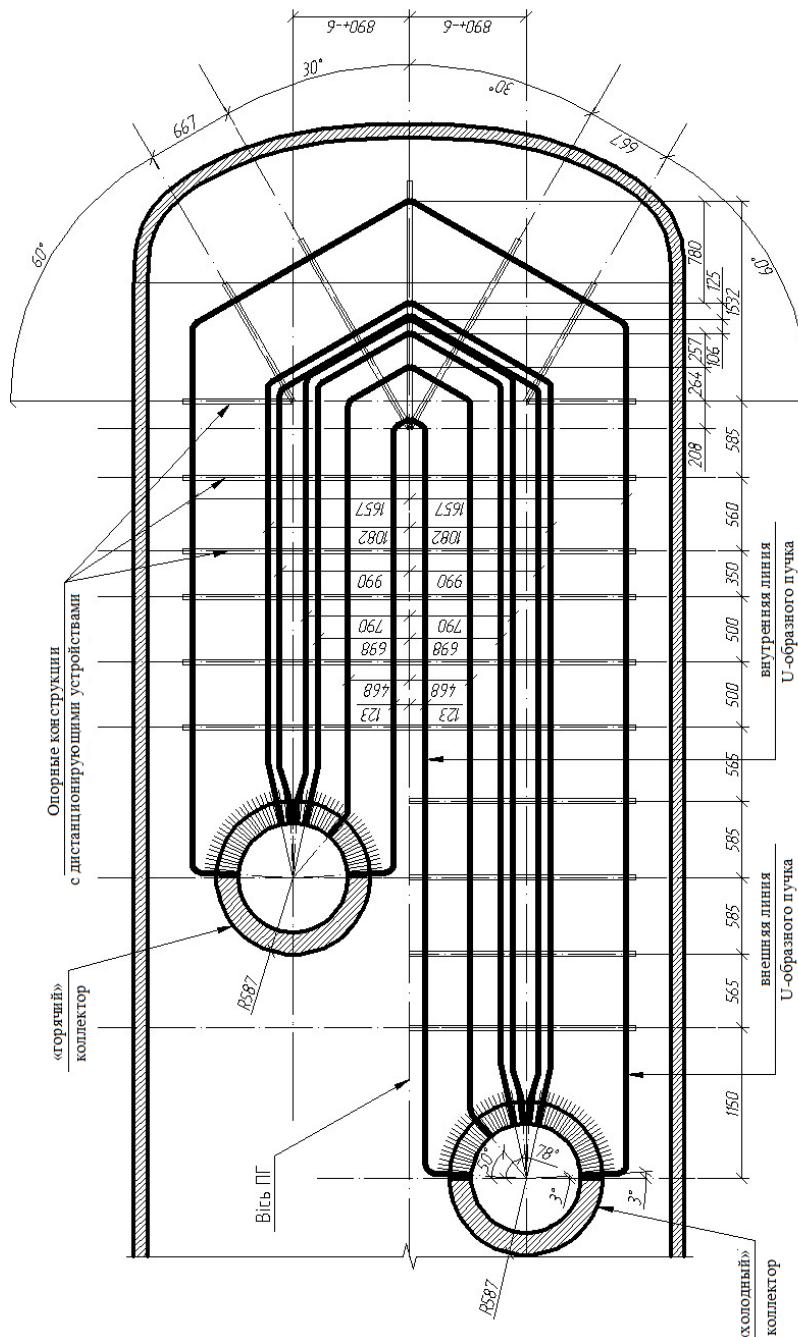


Рис. 3.7 Геометрична схема для побудови скінчено-елементної моделі 7-ми теплообмінних трубок парогенератора ПГВ-1000М (схему побудовано на основі креслеників заводу-виробника)

При моделюванні ліній теплообмінних трубок використовувалися 4-х вузлові оболонкові елементи типу SHELL181 (Рис. 3.8).

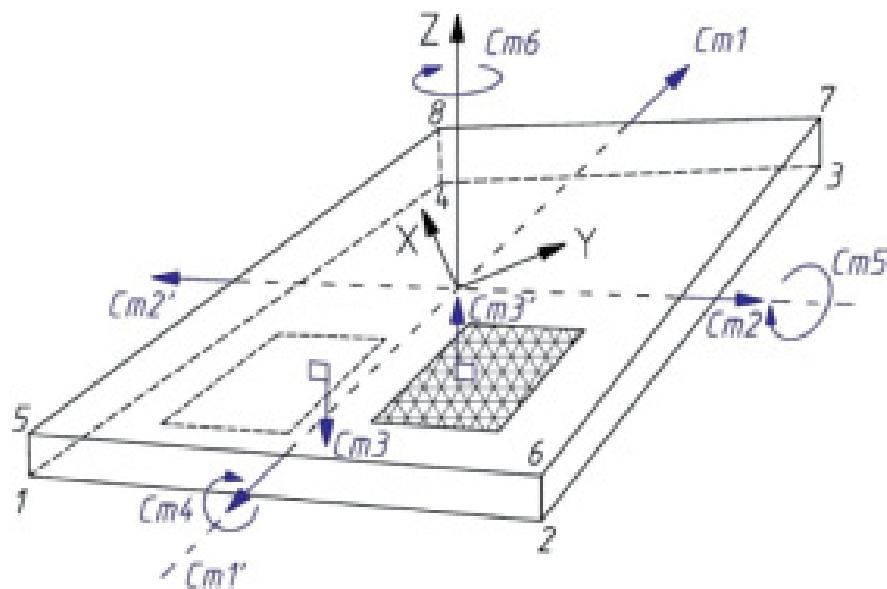


Рис. 3.8 Оболонковий елемент типу SHELL181 (Ст1-Ст6 позначення степенів вільності; 1-8 – вузлові точки)

Згідно з описом бази даних елементів ANSYS [170] елемент SHELL181 має властивості лінійно пружного та пружно-пластичного матеріалу. Із пружних матеріалів можуть прийматись ізотропні, анізотропні і лінійні ортотропні. Пластична поведінка передбачає пружні ізотропні властивості матеріалу (тобто якщо ортотропний матеріал підвернений пластичному деформуванню, комплекс ANSYS буде використовувати ізотропний матеріал з модулем Юнга Е и коефіцієнтом Пуассона). Елемент SHELL181 враховує вплив поперечних зсувних деформацій. На рис. 3.8 зображенено скінченний елемент SHELL181, позначено 8 вузлових точок і 6 ступенів вільності елементу в ортогональній системі координат XYZ. Щільність сітки, що генерується впливає на похибку в обчисленнях, тому визначення оптимальних параметрів сітки у більшості своєї визначає точність розрахунків.

При побудові розрахункової моделі особливу увагу приділено коректному моделюванню граничних умов взаємодії ТОТ з опорними конструкціями в місцях встановлення трубок в дистанціонуючих пристроях (опорних елементів трубок і їх конструктивним особливостям).

Опорні решітки, через які проходять ТОТ, сконструйовані таким чином, що при розігріві і розхолоджуванні ТОТ повинні вільно переміщатися в опорних місцях, при цьому додаткові зусилля і моменти в місцях їх кріплення не повинні виникати. Але скупчення шламу по довжині трубки та в опорних точках може призводити до зміни умов обпирання трубки (границь (ГУ) і кінематичних умов (КУ)). З огляду на конструктивні особливості опорних елементів (Рис. 3.9) взаємодія трубок з дистанціонуючими гратками реалізовано в двох варіантах:

- 1) ТОТ встановлені на хвилеподібні пластини товщиною $t=1,2$ мм (пластини кріпляться до опорних елементів корпусу парогенератора без зварювання з наявністю деформаційного зазору);
 - 2) ТОТ встановлені між плоских пластин, що виключають вертикальні переміщення.

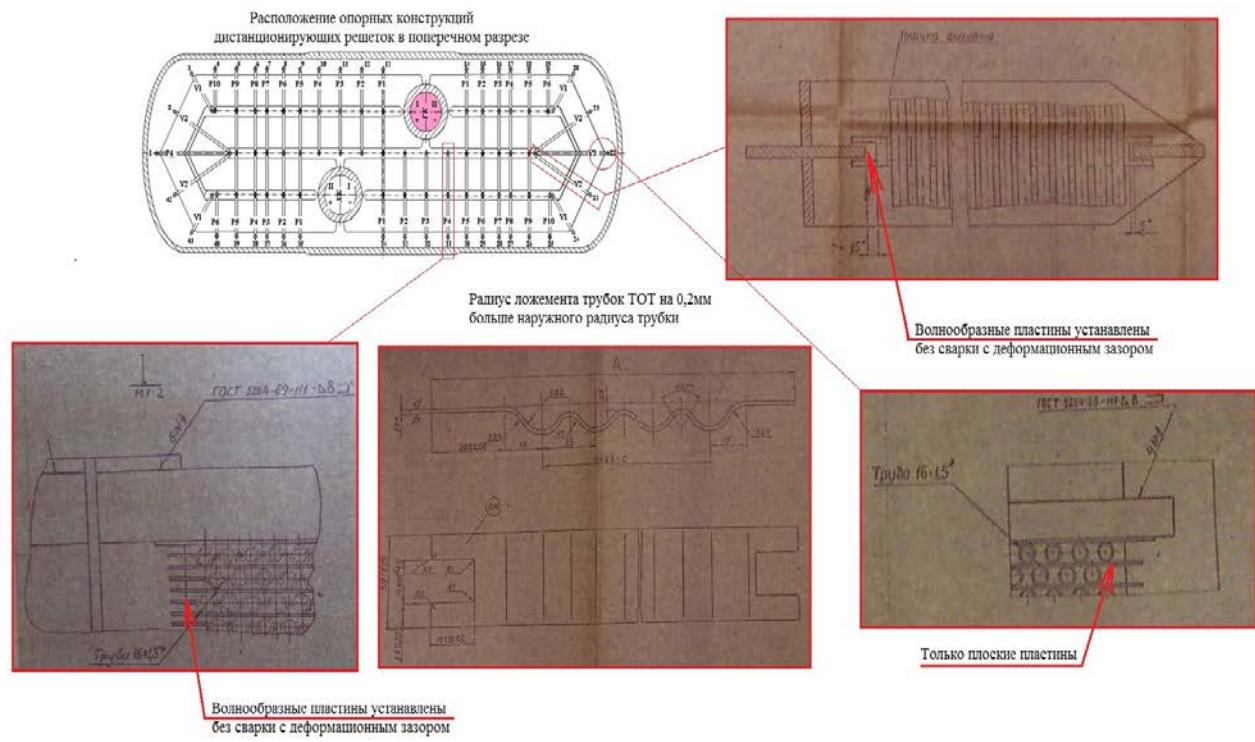


Рис. 3.9 Конструктивні особливості дистанціонуючих опорних елементів

Граничними умовами на торцях трубок в цьому розрахунку є переміщення, обумовлені радіальним температурним розширенням фрагментів створеної моделі колекторів (див. Рис. 3.10).

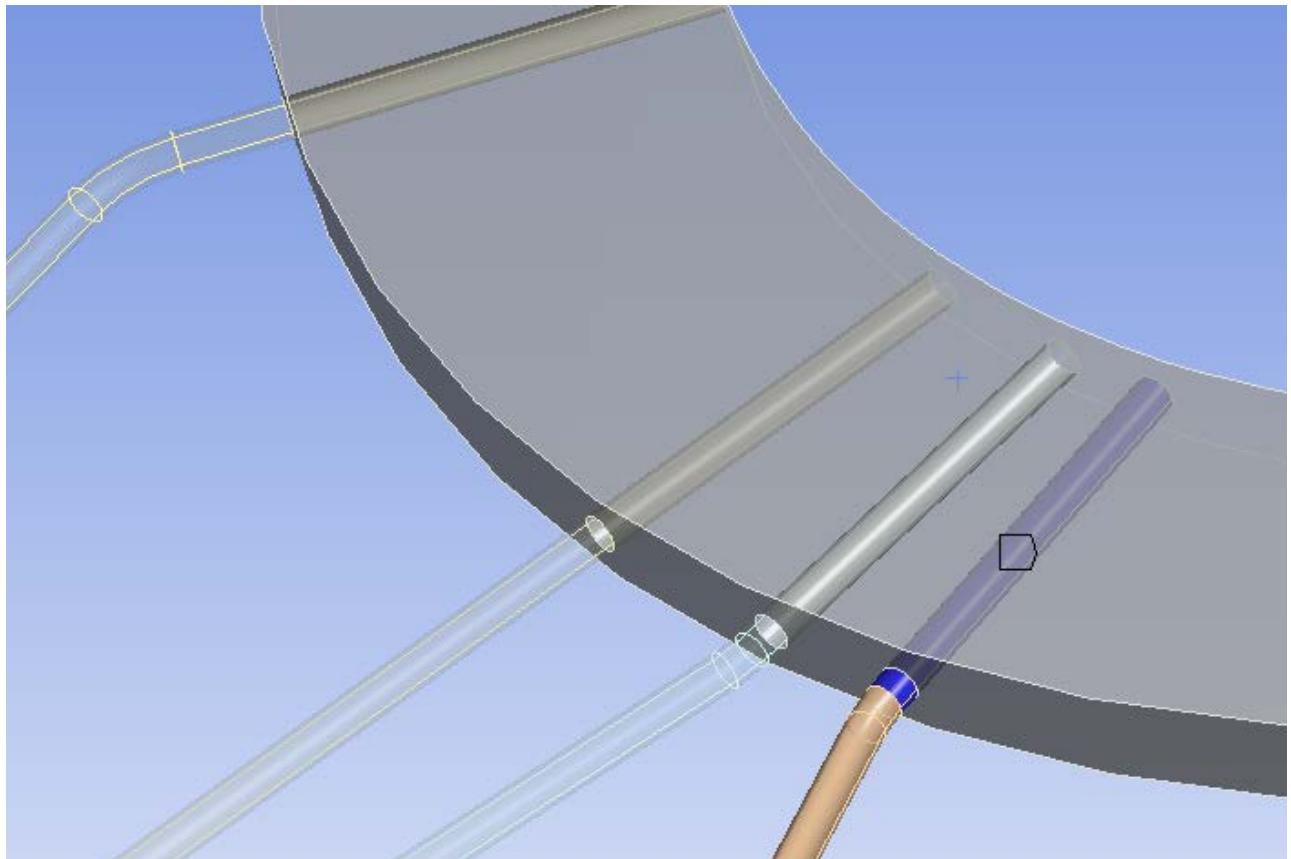
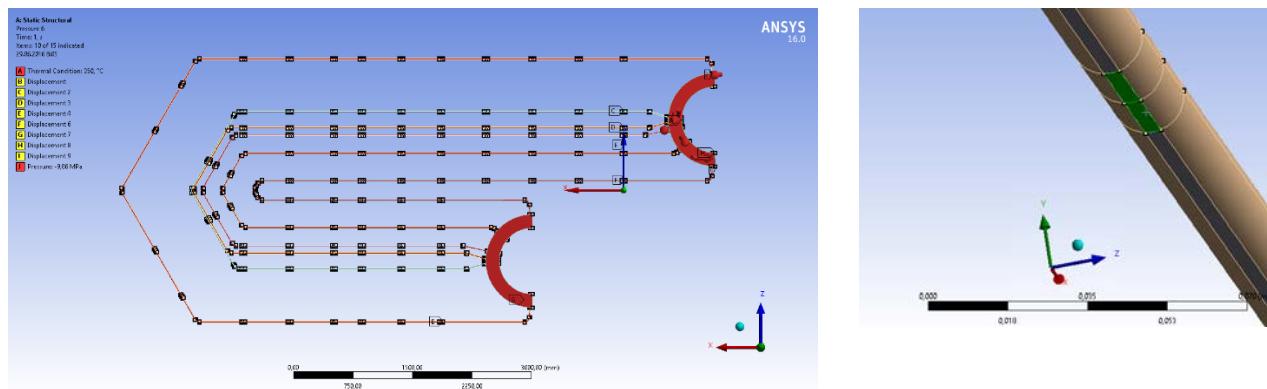


Рис. 3.10 Контактне з'єднання ТОТ-колектор

Враховуючи конструктивні особливості обпирання трубок на опорах у проектному стані, вони не мають можливості переміщення у вертикальному напрямку та в одному горизонтальному. Обрані граничні умови представлені на Рис. 3.11 («а») – загальний вигляд моделі, «б») – граничні кінематичні умови у сегментах обпирання).



a) - загальний вигляд моделі

б) – граничні кінематичні умови у сегментах обпирання (обмеження по координаті зет)

Рис. 3.11 Загальна схема кінематичних і граничних умов

Після побудови розрахункової схеми трубчатки виконано визначення оптимального розміру скінченних елементів для подальших розрахунків та аналіз збіжності результатів. Вибір оптимального розміру СЕ виконаний для розрахункових навантажень у режимі – нормальні умови експлуатації (НУЕ). При аналізі збіжності результатів проаналізовано одну трубку, для якої розглянуто напруження у характерних перетинах. Ці перетини обрані з погляду того, що вони охоплюють всі аспекти геометричної конфігурації обраного елементу (Рис. 3.12), тобто охоплені місця під'єднання трубки до ПГ, прямі ділянки, прямі ділянки біля місць скучення шламу та гини.

Для розрахунку НУЕ обрано наступні вихідні дані:

диаметр ТОТ - $D_{\text{tot}} = 0,016 \text{ м}$;

товщина стінки ТОТ – $h_{\text{tot}} = 0,00150 \text{ м}$;

матеріал ТОТ - сталь 8Х18Н10Т;

модуль пружності – $E = 0,0185 \text{ МПА}$;

щільність ТОТ - $\rho_{\text{tot}} = 8021 \text{ кг/м}^3$

коєфіцієнт Пуассона - $\nu = 0,3$;

щільність шламу - $\rho = 5530 \text{ кг}/\text{м}^3$.

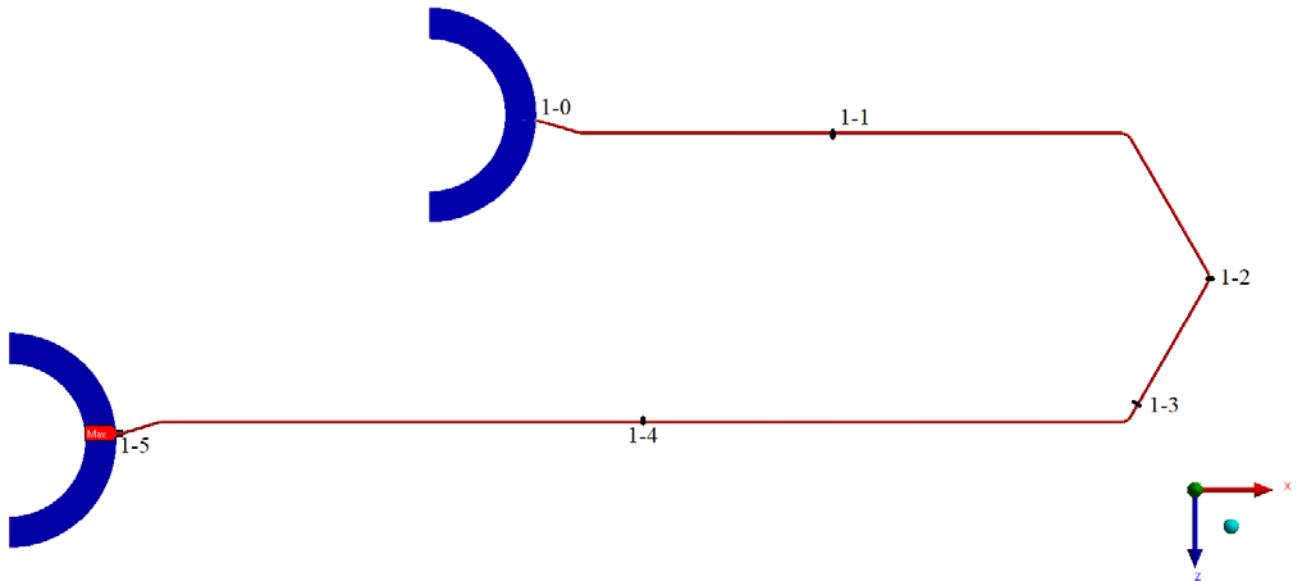


Рис. 3.12 Перетини, обрані для аналізу збіжності сітки

На підставі даних [184] навантаження прийнято наступним чином:

1. внутрішній тиск при НУЕ прийнято як різниця між тиском 1-го та 2-го контурів:

$$P_{\text{вн}} = (17.64 - 7.84) = 9.8 \text{ МПа}$$

2. навантаження на трубопровід від маси теплоносія враховано через приведену питому щільність трубопроводу, яка включає в себе масу труби+масу середовища:

$$\text{маса 1 м.п. труби} = 0,558 \text{ кг}$$

маса середовища, що міститься в 1 м.п. труби:

$$M = V_{\text{д.п.}} * \rho_{\text{д.п.}} = (\pi r^2 * 1\text{м}) * 1000 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} = 3,14 * (0,0065)^2 * 1000 = 0,133 \text{ кг}$$

Приведена питома щільність труби з теплоносієм:

$$\rho_{\text{приведенная}} = \frac{0,558 \text{ кг} + 0,133 \text{ кг}}{S_{\text{сечение трубы}} * 1 \text{ м}} = \frac{0,691 \text{ кг}}{0,0002 \text{ м}^2} = 3455 \text{ кг/м}^3$$

Для визначення оптимального розміру скінченного елементу для наступних розрахунків проаналізовано чотири скінчено-елементні сітки з елементами типу SHELL181 (див. Рис. 3.13)

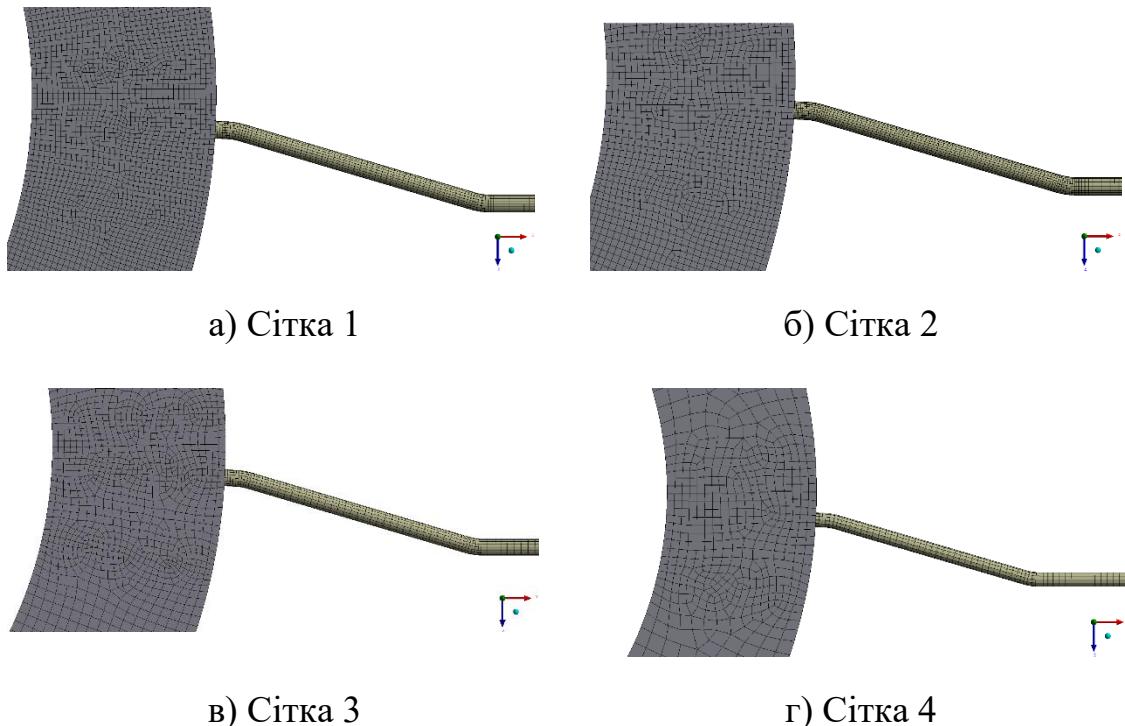


Рис. 3.13 Віди СЕ сіток, які проаналізовані для вибору оптимальної

Відомості про обрані сітки представлені у Таблиці 3.1, а результати розрахунку напружень за перетинами у Таблиці 3.2 та на графіку на Рис. 3.14.

Таблиця 3.1 Відомості про сітки

№ сітки	Кількість вузлів	Кількість елементів
Сітка 1	696658	232610
Сітка 2	436691	132600
Сітка 3	212775	83492

Сітка 4	82160	44609
---------	-------	-------

Таблиця 3.2 Результати розрахунку

№ сітки	Напруження у розглянутих перетинах (Па)					
	1-0	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
Сітка 1	4,415E+07	4,280E+07	4,054E+07	4,066E+07	3,986E+07	4,615E+07
Сітка 2	4,415E+07	4,326E+07	4,112E+07	4,132E+07	4,058E+07	4,601E+07
Сітка 3	4,331E+07	4,318E+07	4,070E+07	4,071E+07	4,074E+07	4,622E+07
Сітка 4	4,348E+07	4,094E+07	3,874E+07	3,900E+07	3,795E+07	4,410E+07

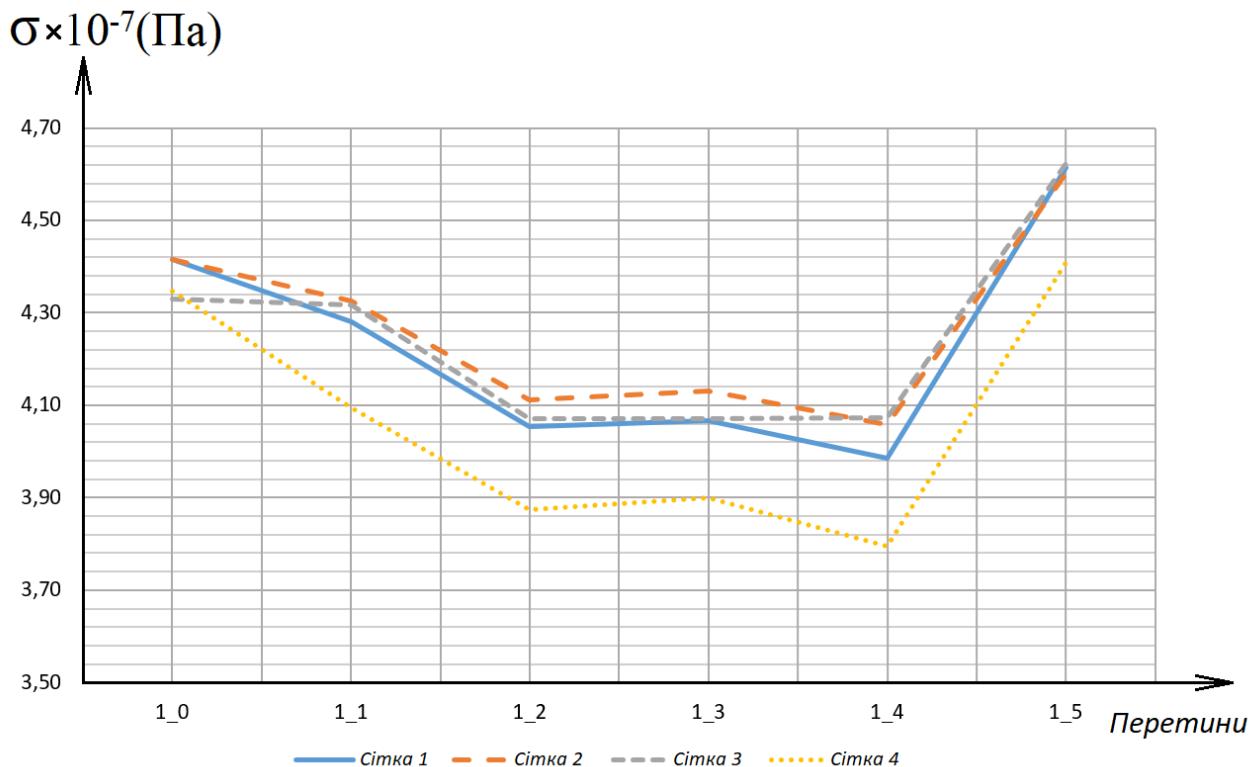


Рис. 3.14 Результати оцінки збіжності розглянутих сіток

Аналіз представлених на Рис. 3.14 та у Таблиці 3.2 значень напружень показує, що кращу збіжність результатів мають Сітка 1, 2 і 3. Для подальших розрахунків обрано Сітку 2.

Верифікацію результатів також виконано з використанням інших скінчених елементів для моделювання трубчатки. Для цієї мети використано елементи типу PIPE288 (див. Рис. 3.15).

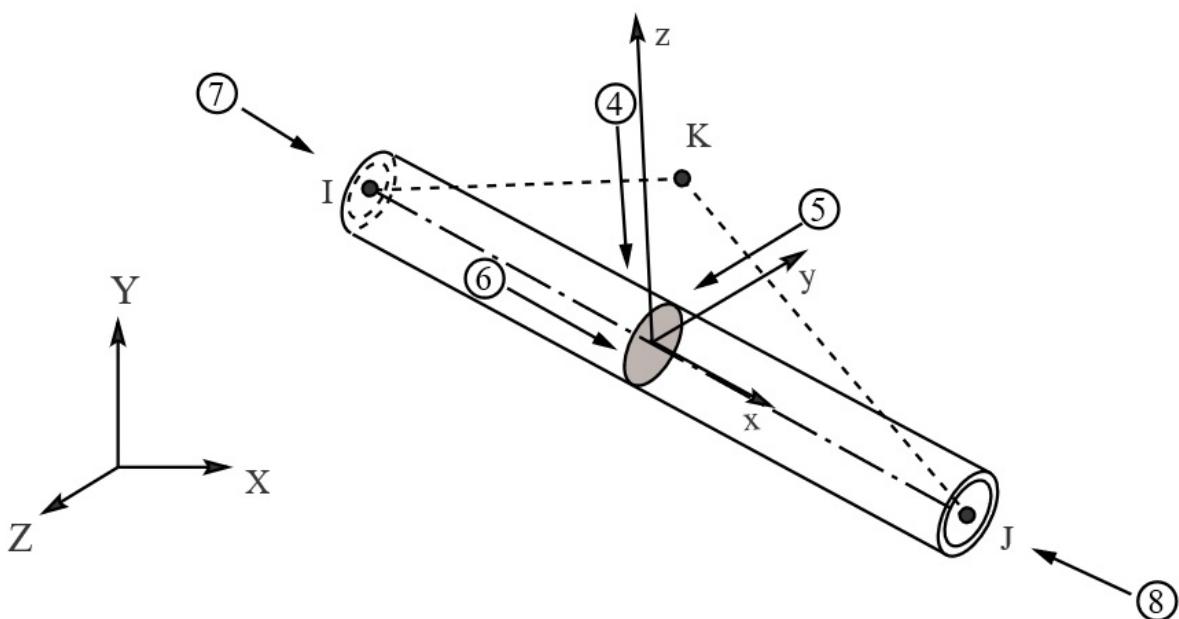


Рис. 3.15 Трубчатий елемент типу PIPE288

Згідно з описом бази даних елементів ANSYS [170], елемент PIPE288 може використовуватись для аналізу структур труб великого та середнього розміру. Оскільки ТОТ є циліндричними оболонками середньої товщини ($h_{\text{TOT}}/R_{\text{сtot}} = 0,23$), то для їх розрахунку застосовано класичну теорію оболонок Кірхгоффа-Лява. PIPE288 є лінійним, квадратичним або кубічним двовузловим елементом і має 6 ступенів вільності. Цей елемент використано в якості перевірки результатів розрахунку НДС трубчатки для умов нормальній експлуатації, але він не застосовний для детальних розрахунків НДС трубчатки із переміною товщиною стінки, що навпаки можна зробити із застосуванням елементів типу SHELL181.

Результати розрахунку та порівняння наведені на графіку на Рис. 3.16 і свідчать про те, що результати розрахунку з використанням елементу типу PIPE288 якісно узгоджуються з результатами з використанням елементів типу SHELL181. Але ітераційні розрахунки із застосуванням елементів типу SHELL181 із використанням різних сіток дають краще сходження результатів, тому у подальших розрахунках використано саме SHELL181. Для вирішення температурної задачі для визначення

розділу температур по товщині оболонко використовувався також скінченний елемент SOLID181.

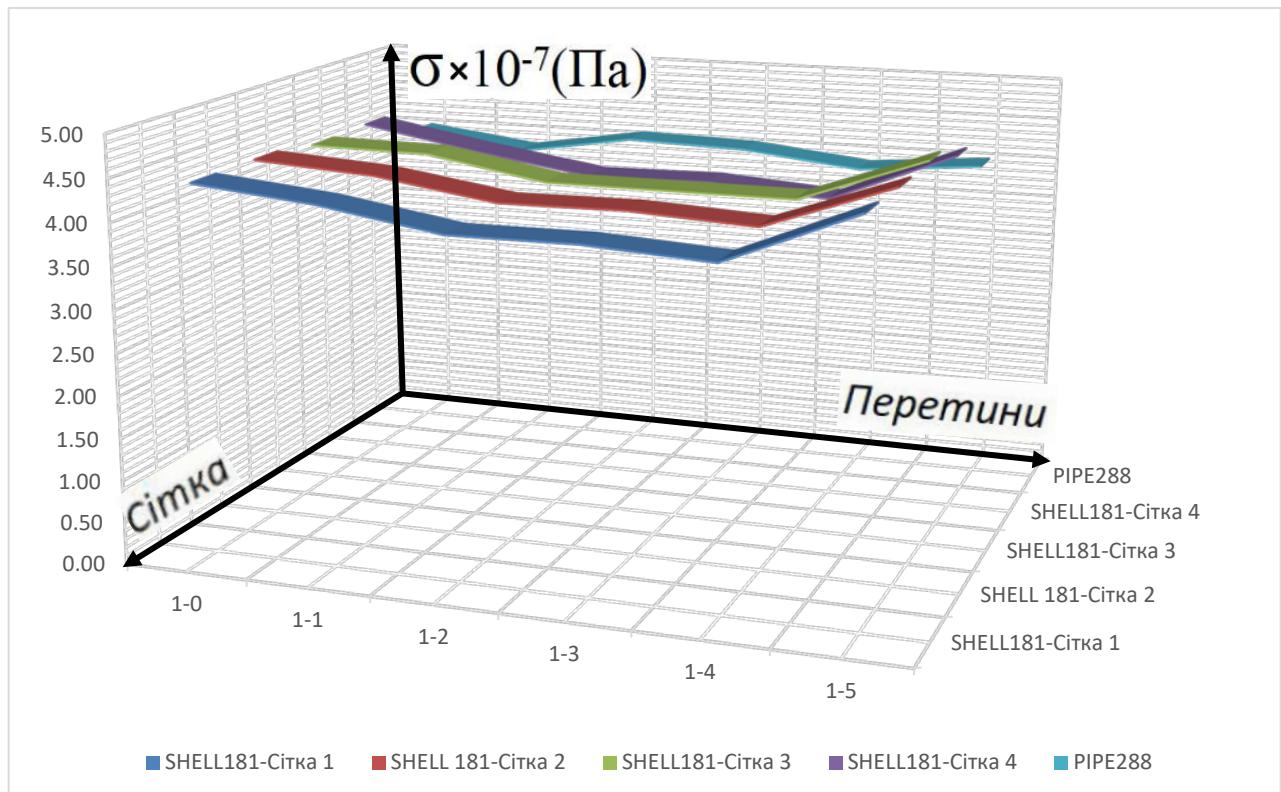


Рис. 3.16 Порівняння значень напружень для характерних перетинів з використанням різних типів скінченних елементів

3.2.2 Аналіз НДС трубчатки в умовах зміни кінематичних та граничних умов через вплив шламу

Результати розрахунку для однієї трубки

Визначення НДС виконано для однієї трубки для нормальних умов експлуатації (значення тиску, температури та інші вихідні дані приведені у розділі 3.2.1).

Основні етапи оцінки НДС трубки і визначення значень напружень у характерних перетинах для НУЕ:

Розрахунок 1. Начальний період експлуатації ПГ, шлам/відкладення відсутні.

Розрахунок 2. Поява шламу у зоні перегину трубки (зона трикутника на Рис. 3.2).

Шлам обмежує переміщення трубки (можливість переміщення трубки обмежено на 25 %, 50 %, 75 % і 100%).

Розрахунок 3. Поява шламу у зоні перегину трубки і у зоні прямої ділянки (зона трикутника - 1 і квадрату - 2 на Рис. 3.2). Шлам обмежує переміщення трубки ((можливість переміщення трубки обмежено на 25 %, 50 %, 75 % і 100%) на двох ділянках.

Напруження у характерних (досліджуваних) перетинах представлені на Рис. 3.16.

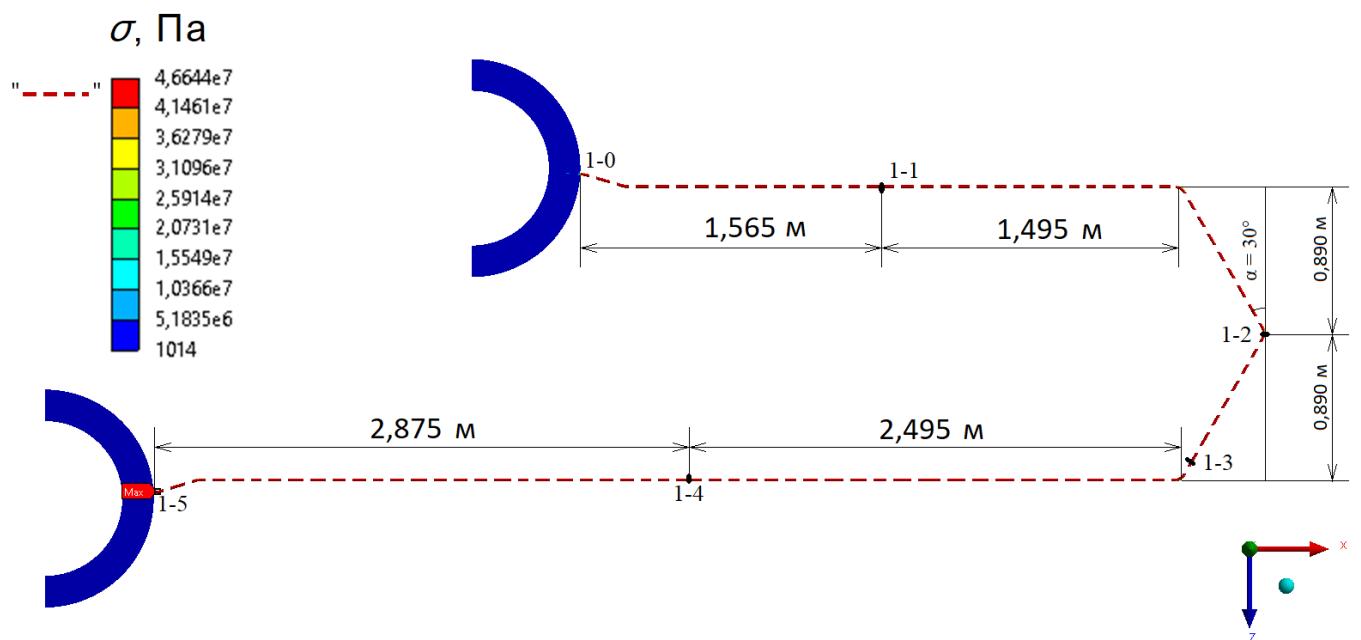


Рис. 3.16 Напруження у характерних перетинах

Моделювання скучення шламу реалізовано за допомогою пружних опор з розрахунковими характеристиками жорсткостей K_x K_y K_z з метою наблизити умови, що моделюються до можливих реальних (див. Рис. 3.17). При цьому обмеження переміщення трубки по кожній з осей варіювалося значенням жорсткості (від мінімальної - переміщення можливо, до максимальної - жорстке закріплення).

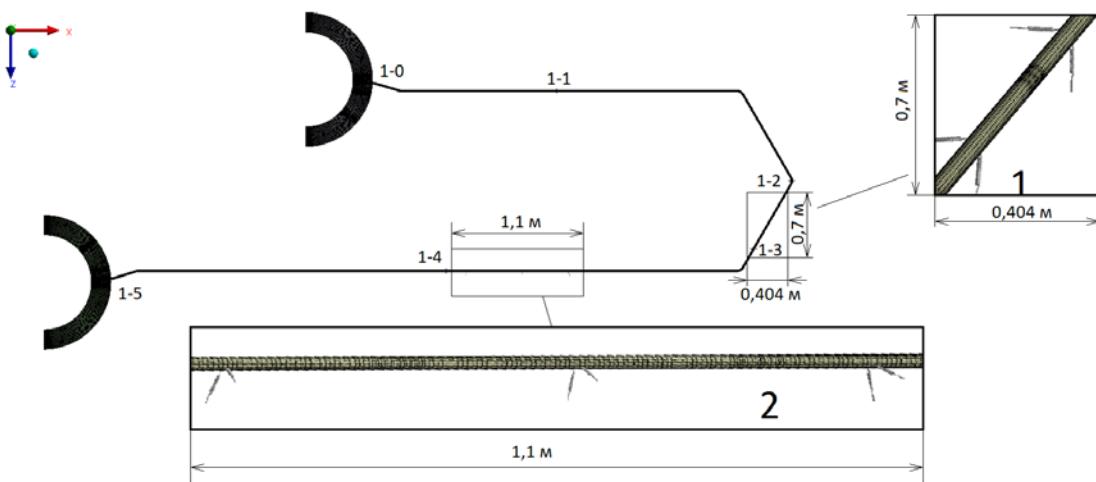


Рис. 3.17 Моделювання граничних умов при скученні та відкладенні шламу (1 – закріплення на перегині, 2 – закріплення на прямій ділянці)

Результати розрахунку напружень у перетинах, що досліджуються для розрахункових випадків (Розрахунок 1 – Розрахунок 3) наведені у Таблиці 3.3 і на графіку (Рис. 3.18).

Таблиця 3.3 Напруження за перетинами

	КУ*	1-0 (Па)	1-1 (Па)	1-2 (Па)	1-3 (Па)	1-4 (Па)	1-5 (Па)
Розрахунок 1	КУ1	4.24E+07	4.12E+07	4.30E+07	4.36E+07	4.14E+07	4.26E+07
Розрахунок 2							
25%	КУ2	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	4.93E+07	6.74E+07
50%	КУ3	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	4.93E+07	6.75E+07
75%	КУ4	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	4.93E+07	6.75E+07
100%	КУ5	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	4.93E+07	6.75E+07
Розрахунок 3							
25%	КУ6	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	6.90E+07	5.26E+07
50%	КУ7	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	6.91E+07	5.26E+07
75%	КУ8	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	6.91E+07	5.26E+07
100%	КУ9	4.35E+07	4.10E+07	3.84E+07	0.00E+00**	6.91E+07	5.26E+07

* КУ – кінематичні умови, відповідають різним варіантам обмеження переміщення трубок через налипання шламу

** – перетин 1-3 знаходиться в області трубки, для якої обмежуються переміщення через накопичення шламу і відповідно в цьому перетині напруження близькі до нуля

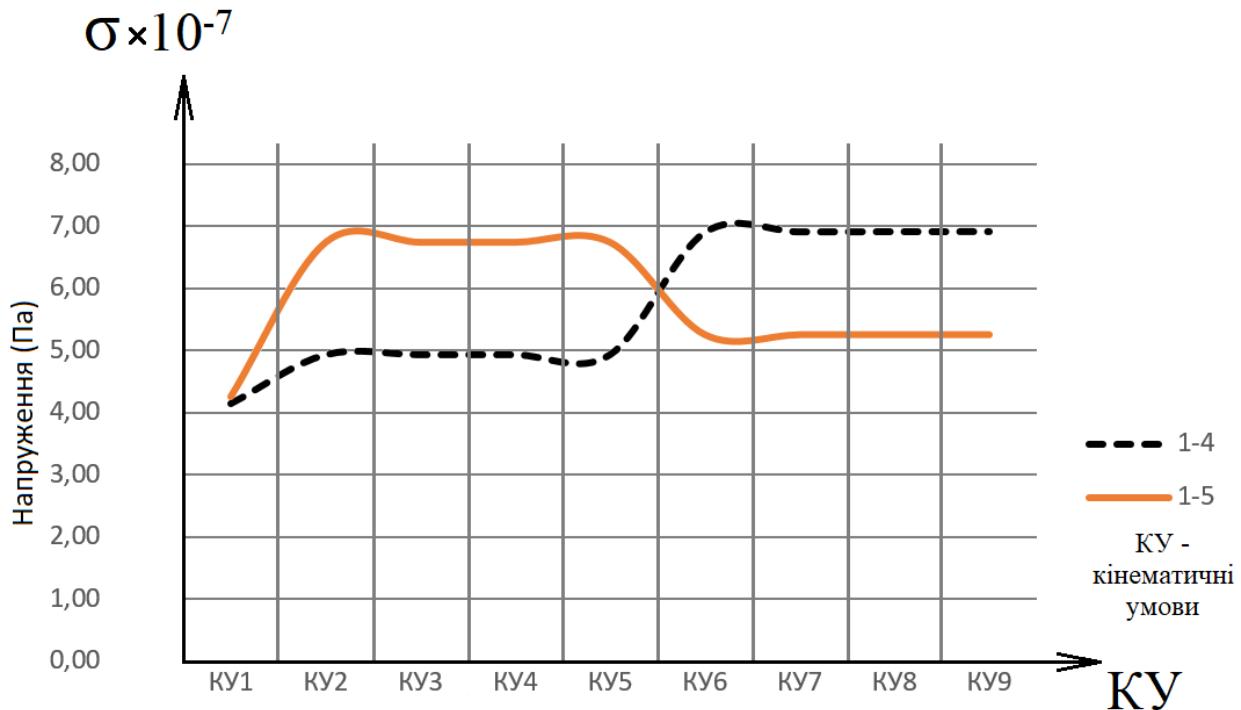


Рис. 3.18 Залежність напружень у перетинах 1-4, 1-5 в залежності від зміни кінематичних та граничних умов закріплення

Як видно з Таблиці 3.3 найбільш суттєва зміна напружень є характерною для перетинів 1-4 і 1-5. Це пояснюється тим, що довжина теплообмінної трубки варіюється від 13 до 15 метрів в залежності від трасування і додаткові жорсткі закріплення в одній половині петлі практично не впливають на НДС в іншій половині петлі. Залежність напруження у перетинах 1-4, 1-5 від зміни кінематичних і граничних умов показані на графіку на Рис. 3.18.

Результати розрахунку для декількох трубок

Нижче на Рис. 3.19 представлені результати розрахунку НДС для декількох (сім) трубок (обґрунтування вибору 7 трубок представлено у підрозділі 3.2.1), які розраховані за тією ж схемою (Розрахунок 1 – Розрахунок 3 і для тих же кінематичних умов).

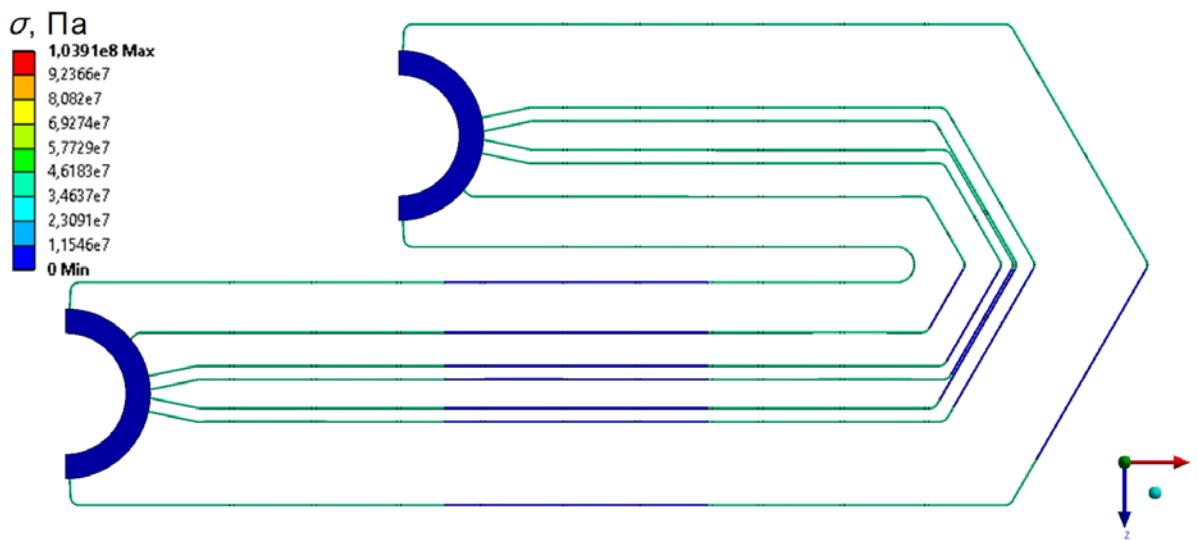
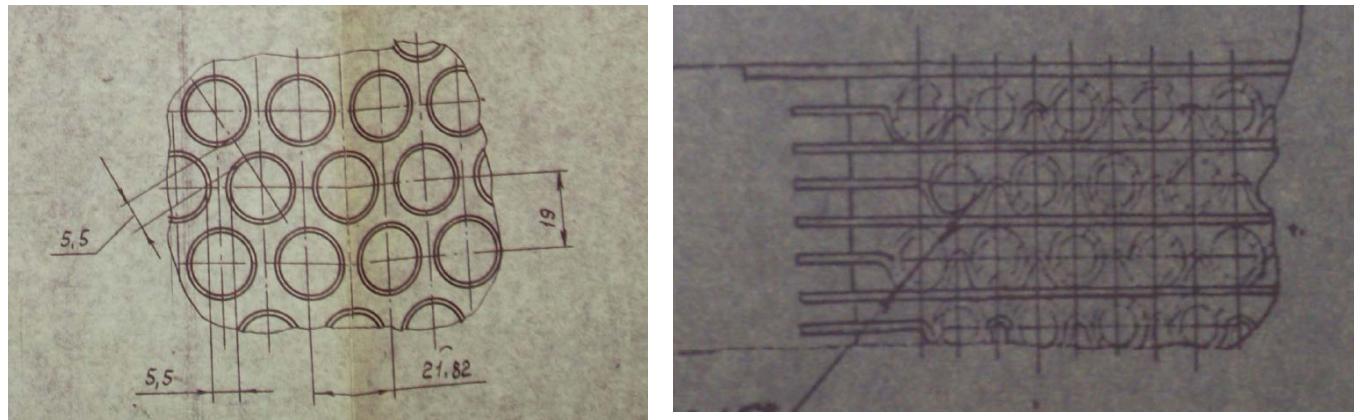


Рис. 3.19 Результати визначення НДС для декількох трубок

Аналіз результатів розрахунків свідчить про те, що тенденція зміни напружень в досліджуваних перетинах зберігається. Безпосередньо значення напружень відрізняються в залежності від геометрії ліній, проте загальна тенденція зберігається.

3.2.3 Аналіз НДС трубчатки в умовах додаткової маси шару відкладення

Для визначення додаткової маси шару шламу, що може вплинути на НДС ТОТ використано проектні кресленики ТОТ ПГ (Рис. 3.20 а) і б)).

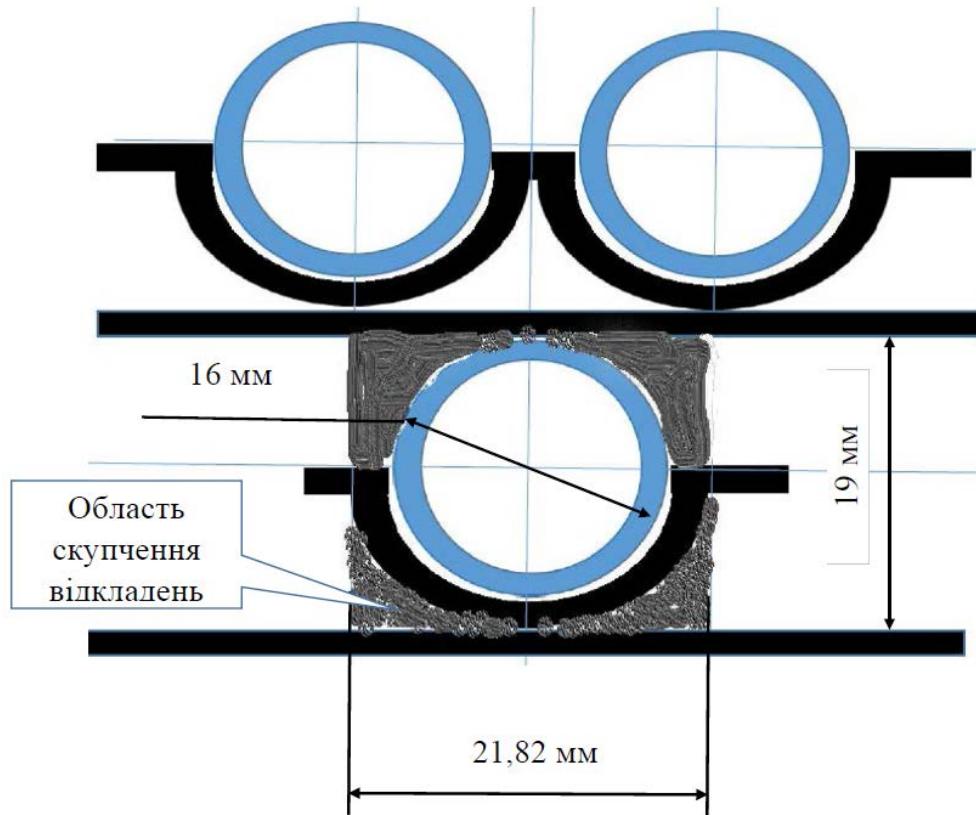


а) відстані між ТОТ

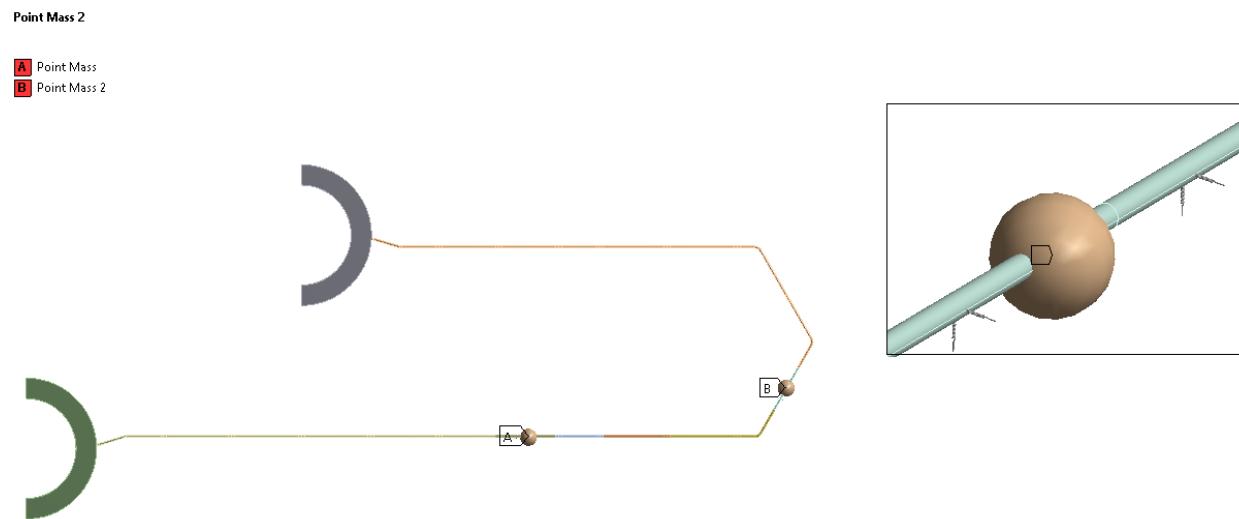
б) розташування ТОТ між опорними елементами

Рис. 3.20 Фрагменти креслеників трубчатки

Виходячи із креслеників на Рис. 3.20 («а»), («б»)) для обчислення маси шару шламу використано вихідні дані і розміри представлені на схемі Рис. 3.21.



а) Схематичне зображення розташування шару шламу



б) Моделювання додаткової маси шару шламу

Рис. 3.21 Схематичне зображення розташування шару шламу

Нижче наведено результати обчислення маси шару шламу.

Виходячи із щільності складових шламу та їх процентного розподілу (див. розділ 3.1):

$\rho_{Fe_3O_4}$ – щільність окису заліза ($\rho_{Fe_3O_4}=5,2 \text{ г/см}^3$), масова доля близько 70%;

ρ_{Cu_2O} – щільність окису міді ($\rho_{Cu_2O}=6,3 \text{ г/см}^3$), масова доля близько 30%,

отримано питому щільність шламу, яка складає:

$$\rho_{шл} = 0,7\rho_{Fe_3O_4} + 0,3\rho_{Cu_2O} = 0,7 * 5,2 + 0,3 * 6,3 = 5,53 \text{ г/см}^3 (5530 \text{ кг/м}^3).$$

Приймаючи до уваги умови розташування шару шламу, що продемонстровані на Рис. 3.1, та виходячи із схеми розташування ТОТ на Рис. 3.21, масу шару шламу на 1 погонний метр може бути обчислена через об'єм простору, що займає шлам навколо трубки. Тобто,

$$m_{шл \text{ на } 1\text{м/п}} = \rho_{шл} * V_{шл}$$

$$\begin{aligned} V_{шл} &= S_{шл} * L = (S_{кв} - S_{кр}) * L = (21,8 * 19 - 3,1415 * 8^2) * 1 = \\ &= 213 \text{ мм}^2 = 2,13 * 10^{-4} \text{ м}^2 \end{aligned}$$

$$m_{шл \text{ на } 1\text{м/п}} = \rho_{шл} * V_{шл} = 5530 * 2,13 * 10^{-4} = 1,17 \text{ кг/мп}$$

Додаткова маса шару шламу на 1 погонний метр ТОТ складає 1,17 кг. З урахуванням додаткового навантаження від шару шламу виконано розрахунки для уточнення граничних та кінематичних умов розташування ТОТ. Для оцінки чутливості розрахункової моделі від додаткового навантаження маси шару шламу виконано такі ітераційні розрахунки:

- розрахунок ТОТ при нормальніх умовах експлуатації без додаткової маси шару шламу (Розрахунок 1*);
- розрахунок ТОТ при нормальніх умовах експлуатації із додатковою рівномірно розсердженою по довжині трубки масою шару шламу у зонах 1 та 2 (Рис. 3.17) без обмеження переміщення ТОТ (Розрахунок 2*);

- розрахунок ТОТ при нормальніх умовах експлуатації із додатковою зосередженою по центру ділянки між опорами масою шару шламу у зонах 1 та 2 (Рис. 3.17) без обмеження переміщення ТОТ (Розрахунок 3*);
- розрахунок ТОТ при нормальніх умовах експлуатації із додатковою зосередженою по центру ділянки між опорами масою шару шламу у зонах 1 та 2 (Рис. 3.17) із обмеженням переміщення ТОТ у межах 50% (Розрахунок 4*).

Для визначення НДС ТОТ при навантаженні обрано варіант при якому на ТОТ діє максимальна маса шару шламу, але при цьому можливість переміщення обмежено лише на 50%. Такий варіант є найгірший з погляду величини напружень (див. Рис. 3.21 «б»), що виникають, оскільки при меншій величині відкладення максимальна маса шару шламу не утворюється, а при більшому відкладенні маса вже не впливає через жорстке закріплення ТОТ у місці максимального скучення шламу.

Результати виконаних розрахунків наведені у Таблиці 3.4 та на Рис. 3.22

Таблиця 3.4 Напруження у розрахунковій моделі від додаткового навантаження маси шару шламу

	1-0 (Па)	1-1 (Па)	1-2 (Па)	1-3 (Па)	1-4 (Па)	1-5 (Па)
Розрахунок 1*	4.24E+07	4.12E+07	4.30E+07	4.36E+07	4.14E+07	4.26E+07
Розрахунок 2* (зосереджена маса)	4.26E+07	4.19E+07	4.78E+07	4.67E+07	4.53E+07	4.61E+07
Розрахунок 3* (зосереджена маса)	4.27E+07	4.18E+07	4.79E+07	4.66E+07	4.53E+07	4.61E+07
Розрахунок 4* (зосереджена маса із обмеженням переміщення)	4.41E+07	4.28E+07	4.76E+07	4.76E+07	4.53E+07	4.61E+07

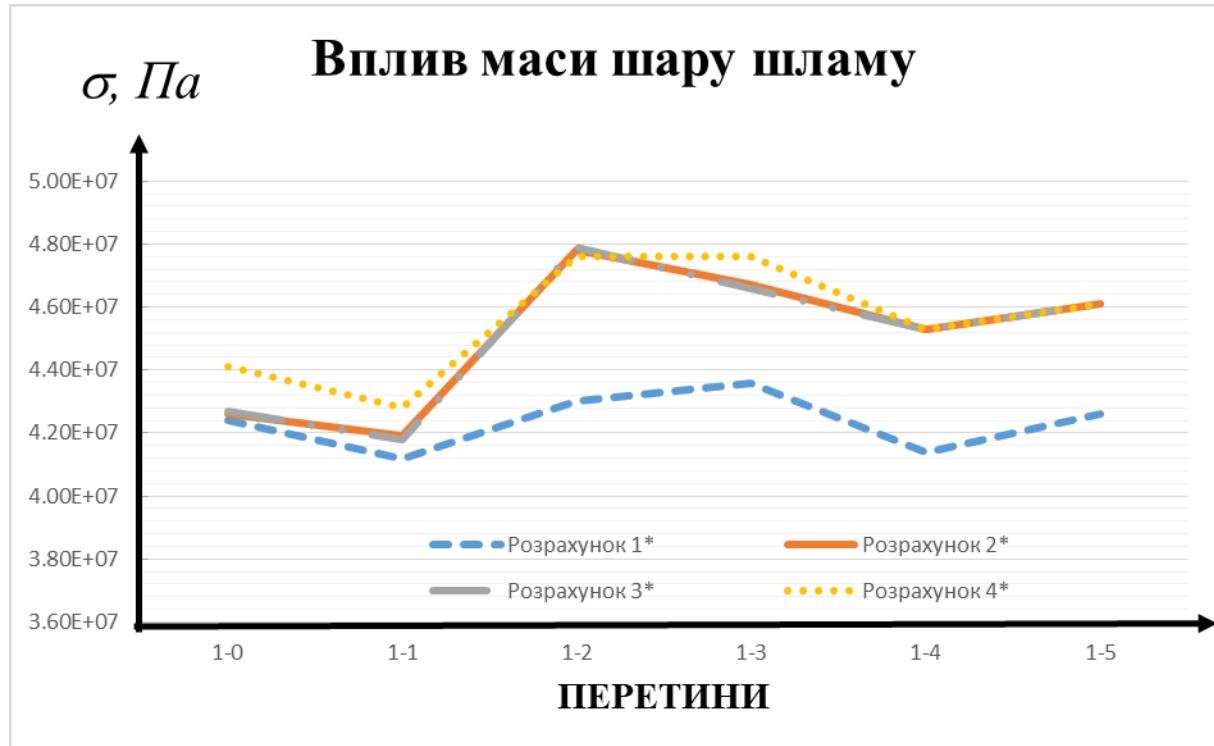


Рис. 3.22 Залежність впливу маси шару шламу на напруження у ТОТ

Результати розрахунку свідчать про те, що за умови впливу на ТОТ навантаження від додаткової маси шару шламу у місцях його найбільшого утворення, напруження в небезпечних перетинах збільшуються в діапазоні до 10%, що свідчить про незначний вплив додаткової маси шару шламу на НДС ТОТ.

Висновки по розділу 3

Підсумовуючи викладене в цьому розділі можна зазначити наступні аспекти негативного впливу шламу на умови роботи трубчатих елементів теплообмінної поверхні:

- процес накопичення відкладення/шламу на теплообмінних трубках змінює умови їх опирання (налипання відкладення навколо трубки фактично замикає її як в тисках) і відповідно обмежує можливість їх вільного (проектного) переміщення при режимах розігріву та розхолодження реакторної установки, що у свою чергу призводить до появи локальних зон з високим рівнем напружень;

– налипання відкладення/шламу на трубку може призводити до збільшення маси окремих ділянок, що також призводить до появи локальних зон з підвищеним рівнем напружень;

– зменшення товщини стінки трубок та поява тріщини, виразок, корозійних плям за рахунок агресивного середовища, що утворюється на поверхні трубки під впливом солей (іони натрію, хлорид-іони, сульфат-іони).

Вперше отримані результати аналізу НДС трубчатки в умовах зміни кінематичних та граничних умов через вплив шламу свідчать про те, що:

1) однією з основних причин пошкоджень ТОТ є забрудненість поверхні теплопередачі шламом/відкладенням;

2) процес утворення та накопичення шламу/відкладення при експлуатації ПГ відбувається поступово, чим більше кількість шламу, тим істотніше його вплив;

3) 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.

З урахуванням зазначеного підходу та з використанням програмного засобу ANSYS проведені ітераційні розрахунки НДС ТОТ з метою визначення мінімально допустимого потоншення стінки ТОТ на прямій ділянці і в області гину з врахуванням впливу шламу і температурних навантажень:

1) для оцінки впливу шламу на НДС ТОТ і умов їх опирання використані рівняння задачі термопластичної тонких оболонок обертання змінної товщини з довільною формою меридіана при дії віссиметричних силових і теплових навантажень. Для чисельного моделювання НДС ТОТ створена розрахункова модель 7 ліній ТОТ з використанням методу скінчених елементів, реалізованого з допомогою програмного комплексу ANSYS;

2) виконано визначення раціонального розміру скінчених елементів для варіантних розрахунків і виконано аналіз збіжності результатів розрахунків для різних

скінчено-елементних сіток. За результатами аналізу збіжності обрано сітку з кількістю вузлів 436691 та кількістю елементів 132600;

3) моделювання скучення шламу реалізовано в різних місцях теплообмінної трубки за допомогою пружних опор з розрахунковими характеристиками жорсткостей K_x K_y K_z і збільшенні питомої ваги ТОТ з шламом на 15%;

4) за наявності шламу в зоні перегину теплообмінної трубки і у зоні прямої ділянки (зона трикутника - 1 і квадрата - 2 на Рис. 3.17) спостерігається різкий стрибок напружень в межах 30% у перетині 1-4 (підпадає у зону впливу крайових умов внаслідок обмеження переміщення трубки) і у перетині 1-5 (в області кріплення трубки в колекторі ПГ);

5) такий характер розподілу напружень пояснюється тим, що довжина теплообмінної трубки міняється від 13 до 15 метрів в залежності від трасування, і додаткові жорсткі закріплення в одній напів петлі практично не впливають на НДС у другій напів петлі;

6) накопичення/налипання шламу на теплообмінних трубках змінюють умови їх обpirання і відповідно, закладена в проекті можливість їх вільного переміщення істотно знижується, призводить до непроектного закріплення і утворення локальних зон з високим рівнем напружень;

7) за умови впливу на ТОТ навантаження від додаткової маси шару шламу у місцях його найбільшого утворення, напруження в небезпечних перетинах збільшуються в діапазоні до 10%, що свідчить про незначний вплив додаткової маси шару шламу на НДС ТОТ.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ НДС ТА ОЦІНКА ЦЛІСНОСТІ ТРУБЧАТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПГ В УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

4.1 Формування вихідних даних для розрахунку НДС ТОТ ПГ

Постановка задачі

В низці випадків при аваріях, які супроводжуються втратою тепловідведення по другому контуру (наприклад, втрата основної та аварійної живильної води, повне знестирумлення енергоблоку), однією із відновлювальних дій з ліквідації аварій та аварійних ситуацій (ІЛА) на реакторній установці (РУ), є відновлення підживлення парогенераторів, у тому числі і після істотного зниження рівня води в ньому. Такі дії, зокрема приписані штатними експлуатаційними процедурами з керування аварією. При цьому важливим фактором, який обмежує, з погляду відновлення підживлення ПГ, є ефективність тепловідведення для зниження температури теплоносія першого контуру, і відповідно, охолодження активної зони. З урахуванням того, що до моменту відновлення ПГ поверхня теплообміну з боку другого контуру може бути частково або повністю оголена, подавання холодної води в ПГ може привести до виникнення суттєвих термічних напружень на теплообмінних трубках ПГ, у зв'язку із чим виникає необхідність аналізу впливу заливання холодної води на цлісність трубчатих елементів ПГ. Оскільки при таких аваріях найбільш вразливим елементом ПГ є трубчатий пучок ПГ, то основну увагу приділено розробці теоретичного методу оцінки цлісності з урахуванням технічного стану, щоб обрати обґрутовані та коректні шляхи для запобігання аварій і ліквідації їх наслідків.

Для аналізу НДС трубчатих елементів ПГ використані результати ВСК ТОТ ПГ. ВСК дозволяє знаходити дефекти і місця їх зародження в ТОТ. Під зародженням в ВСК ТОТ розуміється будь-яке відхилення сигналу контролюючого пристроя від граничних значень. Дефект – це зародження з граничною глибиною. Якщо глибина дефекту перевищує граничне значення, то ТОТ, на якій він розташований, підлягає виводу з експлуатації (методом глушіння). Окрім цього для теоретичних розрахунків

НДС ТОТ використані результати теплогідравлічних розрахунків, які представлені українською аналітичною групою у звіті [136], а саме:

- температура теплоносія;
- внутрішній і зовнішній тиск (перепад тиску) з параметрами, як функція часу при розвитку аварії;
- температура теплових структур, які моделюють ТОТ;
- температурні навантаження з параметрами, як функція часу.

Вибір розрахункового сценарію для аналізу

З безлічі сценаріїв розвитку вихідних подій (ВП), які супроводжуються значним зниженням рівня в ПГ найбільший інтерес з погляду подачі води у частково чи повністю осушений ПГ представляють ті сценарії, які призводять до одночасної втрати під живлення всіх ПГ. До таких сценаріїв відносяться - "Повна втрата живильної води", а також "Повне знецінення енергоблоку".

На підставі результатів якісного аналізу вихідних подій для подальшого детального аналізування обрано - "Повне знецінення енергоблоку". Для оцінки впливу часу відновлення подачі води в ПГ розглядаються два сценарія – з відновленням подачі води в один ПГ на 2500 секунді (сценарій №1) і на 9000 секунді (сценарій №2). Втрату води прийнято $75 \text{ м}^3/\text{час}$ по лінії аварійної живильної води. Температуру води, що подається, прийнято 5°C .

Теплогідравлічні розрахунки виконані з використанням відомого в інженерній практиці для розрахунків перехідних процесів програмного засобу RELAP5 [92]. Водночас необхідно відмітити, що цей розрахунковий код є системним теплогідравлічним кодом у зосереджених параметрах, де параметри усереднюють в розрахункових вузлах моделі (контрольних об'ємах і з'єднаннях) і розрахункові температури в контрольних об'ємах, що моделюють відповідну частину другого контуру ПГ, являють собою деяку осереднену температуру суміші, що призводить до

отримання оптимістичних (з погляду температурних напружень) умов на теплообмінних трубках ПГ і не дає чіткої уяви про локальні параметри.

Початкові умови (з погляду температурних навантажень)

З рахуванням викладених вище аспектів, аналіз НДС трубчатих елементів ПГ та оцінка цілісності ТОТ виконано для двох граничних випадків:

1) «**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

2) «**Термомеханічне навантаження 2**» (з погляду виникнення термічних напружень) – в якості початкових умов по температурі приймались результати розрахунку, отримані з використанням RELAP [92]. При подаванні аварійної живильної води з температурою 5 °C, температура води 2-го контуру у верхньому об’ємі трубочки знаходиться в діапазоні 278-295°C, а на внутрішній поверхні теплообмінної трубки значення температури приймалось 320°C.

4.2 Оцінка НДС і цілісності ТОТ за наявності нерегулярності геометрії

Визначення допустимих напружень

Оскільки трубки теплообмінної поверхні ПГ є елементом важливим для безпеки АС, то визначення допустимих напружень в цьому випадку для матеріалу трубки також виконується відповідно до атомних норм, а саме ПНАЭ Г-7-002-86 [153].

Нижче у Таблиці 4.1 представлена фізико-механічні властивості сталі 08Х18Н10Т, прийняті за даними ПНАЭ Г-7-002-86 [153].

Таблиця 4.1

Характеристика	Температура, °C							
	20	50	100	150	200	250	300	350
Границя міцності R_m^T , МПа	510	471	461	441	421	421	412	412
Границя плинності $R_{p0,2}^T$, МПа	216	206	206	196	187	187	177	177
Температурний коефіцієнт линійного розширення $\alpha \cdot 10^6$, $1/{}^\circ\text{C}$	-	16,4	16,6	16,8	17,0	17,2	17,4	17,6
Модуль пружності, ГПа	205	202	200	195	190	185	180	175

Виходячи із зазначених характеристик матеріалу ТОТ ПГ та відповідно до вимог ПНАЭ Г-7-002-86 [153] допустимі напруження $[\sigma]$ розраховані для температури від 20°C до 350°C з інтервалом 50°C , за наступною формулою:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_m^T}{n_m}; \frac{R_{p0,2}^T}{n_{0,2}} \right\}, \text{ де } n_m = 2,6, n_{0,2} = 1,5,$$

Значення допустимих напружень представлені у Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Значення допустимих напружень для різних умов експлуатації

Режим	Категорія напружень	Допустимі напруження $[\sigma]$ МПа для сталі 08Х18Н10Т за умов НЕ, ПНЕ та АС						
		НЕ					Гідрравлічні випробування ($T_h=80^\circ\text{C}$)	
		Позначення	$T, {}^\circ\text{C}$					
			20	280	300	320	350	Позначення
НЕ	(σ) ₁	$[\sigma]$	144	121	118	118	118	$1,35[\sigma]^{\text{Th}}$
	(σ) ₂	$1,3[\sigma]$	187	157	153	153	153	$1,7[\sigma]^{\text{Th}}$
ПНЕ	(σ) ₁	$1,2[\sigma]$	173	145	141	141	141	-
	(σ) ₂	$1,6[\sigma]$	230	193	189	189	189	-
AC	(σ) ₁	$1,4[\sigma]$	201	170	165	165	165	-
	(σ) ₂	$1,8[\sigma]$	259	218	212	212	212	-

НЕ – нормальні умови експлуатації

ПНЕ – порушення нормальних умов експлуатації

AC – аварійна ситуації

Границі кінематичні умови

Як вже відмічалось у Розділі 3, опорні решітки, через які проходять теплообмінні трубки, сконструйовані таким чином, що при розігріві і розхолодженні трубки повинні вільно рухатись горизонтально в опорних місцях і в цьому випадку додаткових зусиль і моментів в місцях їх спирання не виникає. Водночас, як відмічено у параграфі 3.2.2 цієї роботи скупчення шламу призводить до зміни умов спирання і закріплення трубки. І в цьому випадку, з метою наблизити розрахункову модель до реальних умов дистанціануючі елементи системи опорних конструкцій реалізовані моделюванням пружних опор з розрахунковими характеристиками жорсткостей K_1 и K_2 (див. Рис. 4-1).

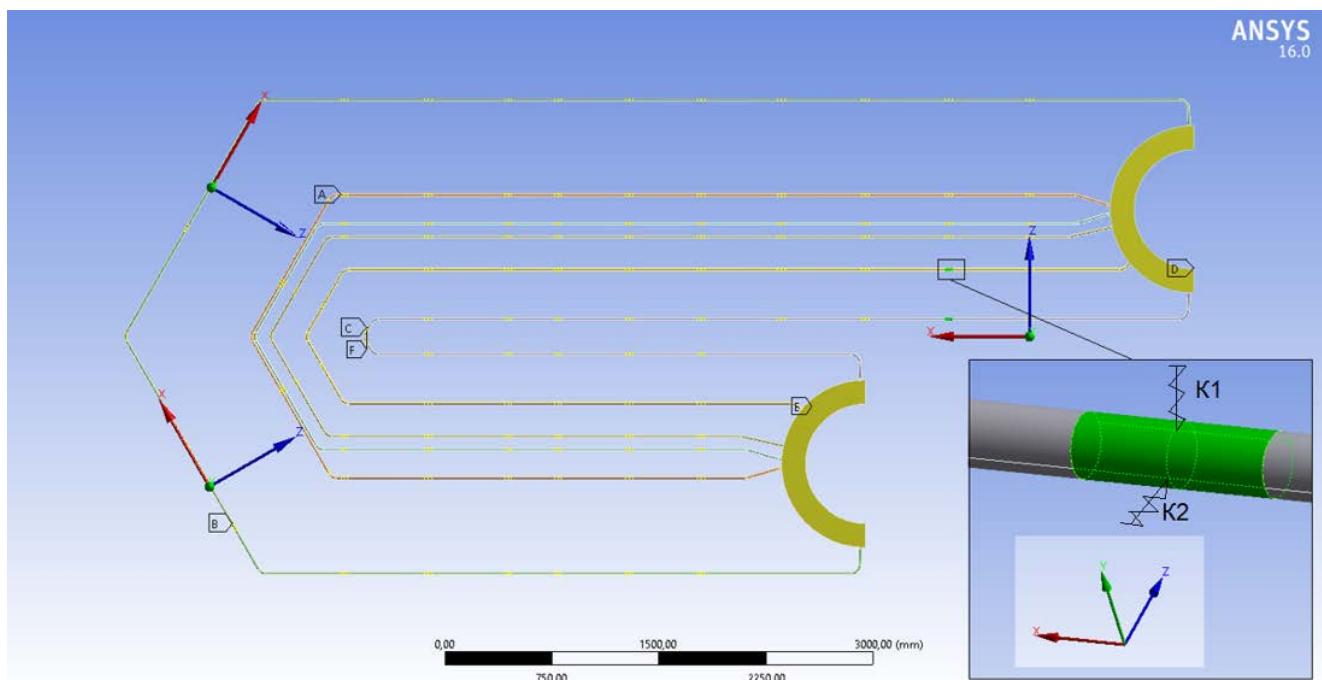


Рис. 4.1 Накладання кінематичних граничних умов

Оцінка НДС ТОТ з урахуванням нерегулярності геометрії при жорстокому термомеханічному навантаженні

Оцінку цілісності трубчастки виконано за принципом субмоделінгу, коли на першому етапі оцінено НДС всієї трубки, визначено найбільшу навантажену ділянку, її вирізано із загальної моделі із збереженням кінематичних і граничних умов

конкретної ділянки у глобальній моделі і на основі більш дискретної скінчено елементної сітки детально проаналізовано її НДС. Загальна блок схема такого підходу представлена на Рис. 4.2.

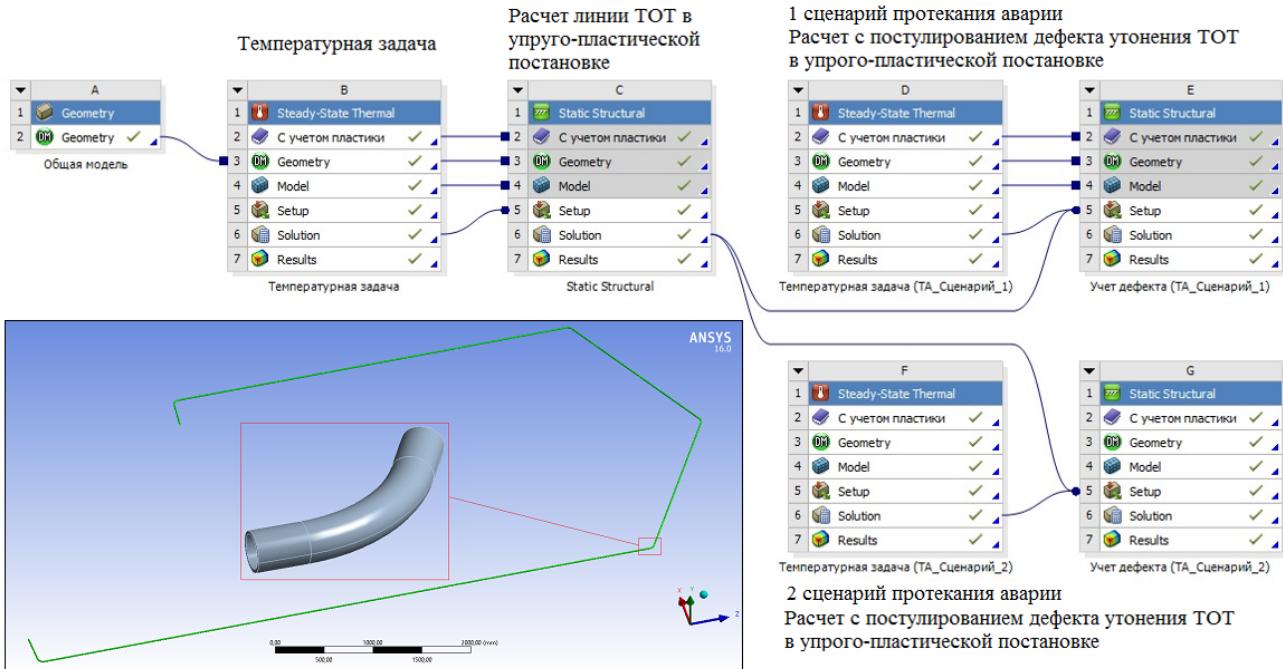


Рис. 4.2 Блок-схема розрахунку за принципом субмоделінгу

Далі розглядаються навантаження, що притаманні жорсткому термомеханічному навантаженню при розгортанні аварійних подій.

Вихідні дані для розрахунку:

$$D_{\text{TOT}} = 0,016 \text{ м} \text{ (зовнішній діаметр ТОТ);}$$

$$h_{\text{TOT}} = 0,0015 \text{ мм} \text{ (товщина стінки ТОТ);}$$

Сталь 8Х18Н10Т (матеріал ТОТ);

$$E = 0,0202 \text{ МПа} \text{ (модуль пружності);}$$

коєфіцієнт Пуассона - $\nu = 0,3$

$$\rho_{\text{TOT}} = 10161 \text{ кг/м}^3 \text{ (щільність ТОТ разом з теплоносієм);}$$

$$P = 9,8 \text{ МПа} \text{ (тиск);}$$

300°C – температура на внутрішній поверхні ТОТ

5°C – температура на зовнішній поверхні ТОТ

Механічні властивості при пружно-пластичній поведінці матеріалу прийняті за даними розділу 2.2.2.

Градієнт температур, що виникає при зазначеному термомеханічному навантаженні приведено на Рис. 4.3.

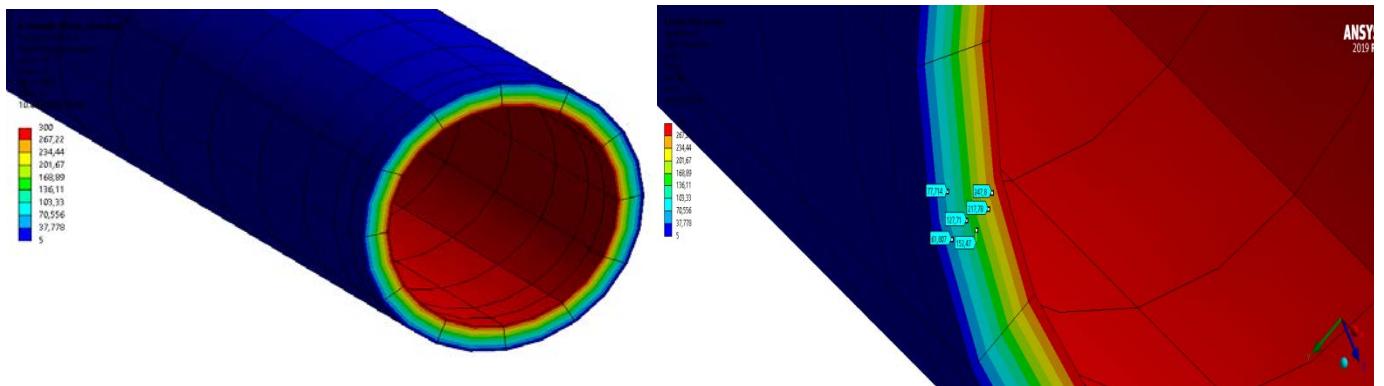


Рис. 4.3 Градієнт температур по стінці ТОТ при жорсткому термомеханічному навантаженні

З метою уточнення поведінки трубок теплообмінної поверхні при проходженні перехідного процесу виконується аналіз НДС у часі. В якості аварійного сценарію, який розглядається, обрано «Повне знеструмлення енергоблоку». У цьому випадку при відсутності електропостачання відбувається зупинка обладнання та поступове припинення циркуляції теплоносія. Внаслідок припинення циркуляції ускладнюється тепловідведення у ПГ, температура води поступово зростає і починається її випаровування, при якому рівень води в ПГ поступово зменшується. Температура води у першому контурі приведена на Рис. 4.4.

Коли рівень води досягає критичної позначки, спрацьовує уставка на початок подавання аварійної живильної води від аварійних насосів живильної води. В цьому випадку в ПГ починає подаватись вода з температурою 5°C (278°K) (Рис. 4.4) і витратою $75 \text{ м}^3/\text{год}$ по лінії аварійної живильної води (Рис. 4.5).

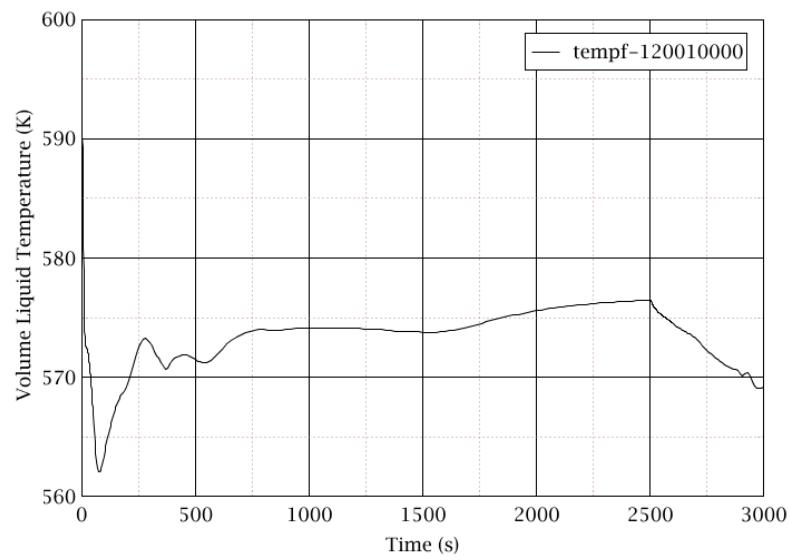


Рис. 4.4 Температура теплоносія першого контуру

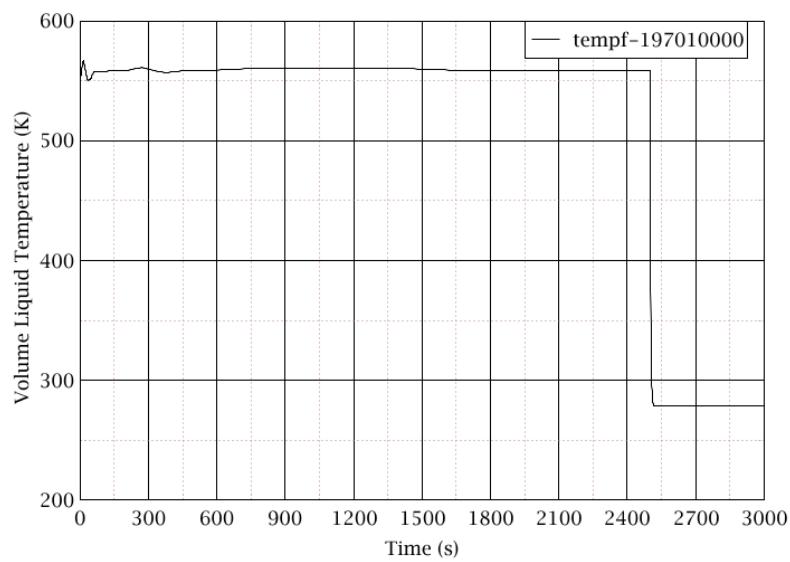


Рис. 4.4 – Початок подавання живильної води

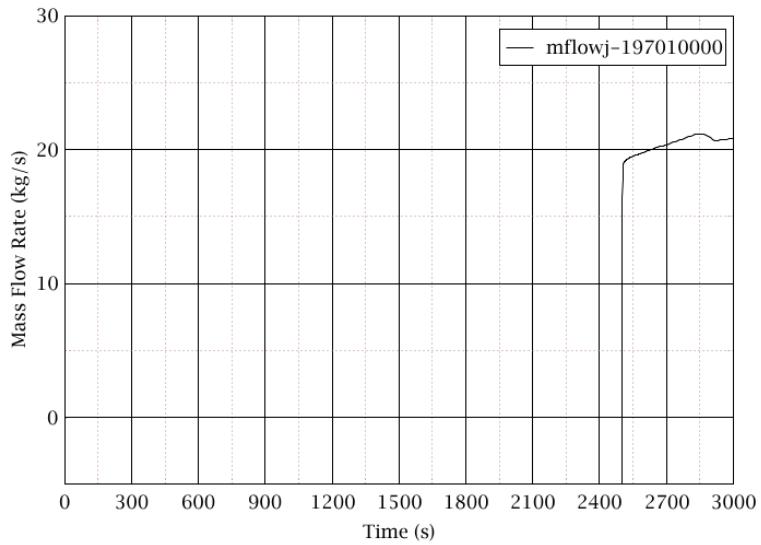


Рис. 4.5 – Витратна характеристика при подаванні живильної води

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. Живильна вода подається через відповідні форсунки і розпилюється по всьому об'єму ПГ., що і прийнято в розрахунку з метою аналізу НДС при жорсткому термомеханічному навантаженні.

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. 4.6.

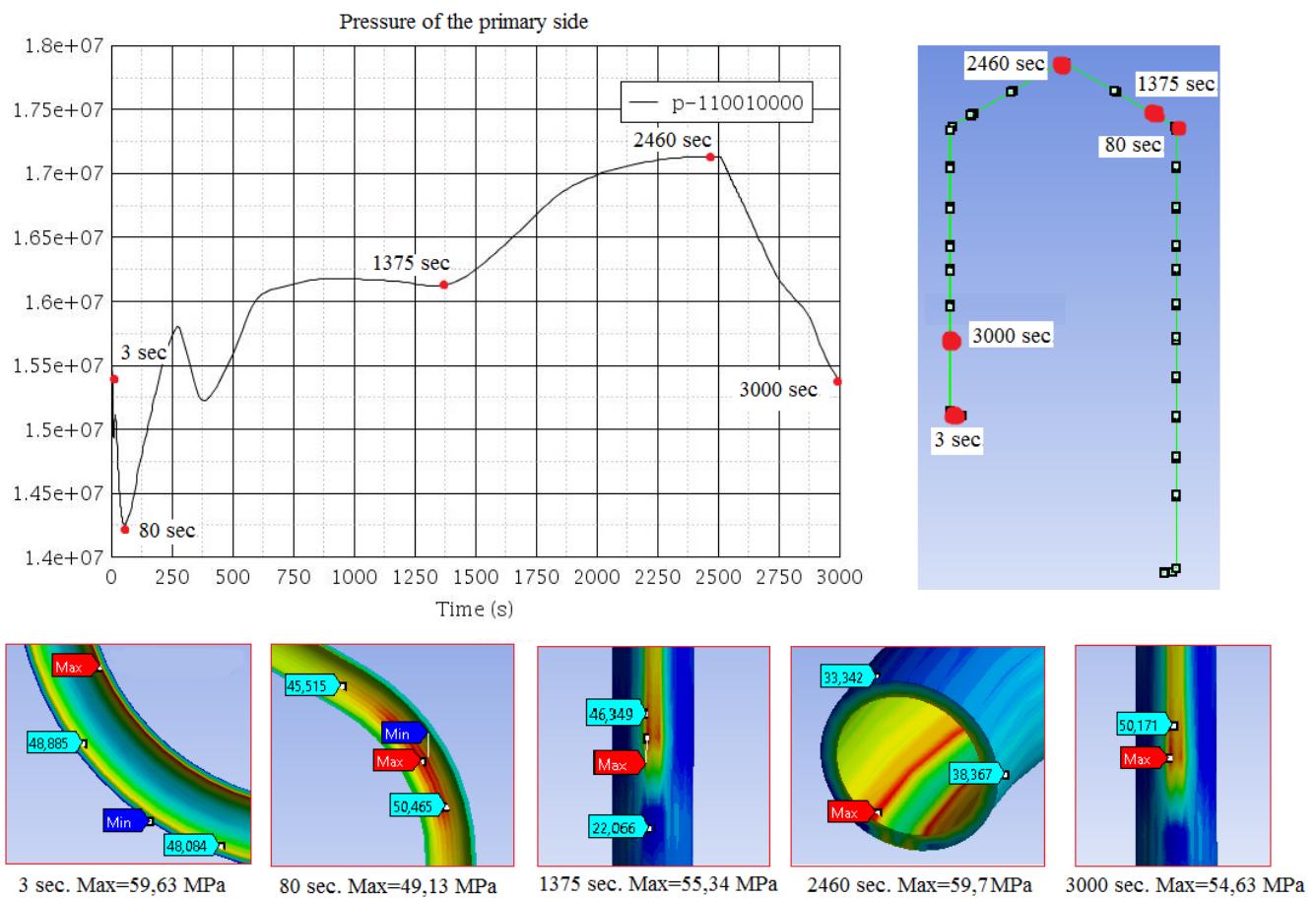


Рис. 4.6 Визначення екстремумів еквівалентних напружень в ТОТ при нестационарному режимі (часові точки і значення напружень приведені на графіку залежності тиску першого контуру від часу)

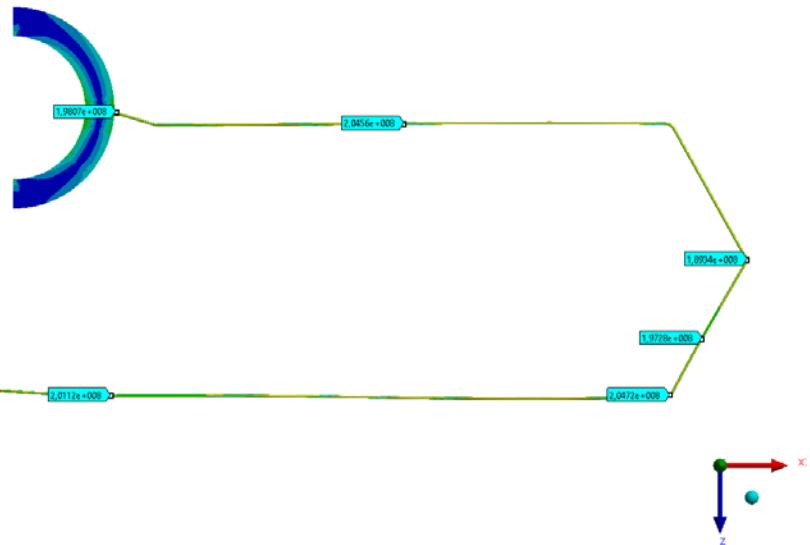
Для подальшої оцінки цілісності трубчатки обрано зовнішню ТОТ верхнього шару трубчатки, яка має максимально великі відстані між опорними елементами, з максимальними температурними деформаціями.

Для цієї ТОТ виконано аналіз НДС в якому на переміщення трубки накладено обмеження через вплив шару шламу у місцях його найбільшого скучення. Ці обмеження визначені як жорстке закріплення у зоні 1 і зоні 2 Рис 3.17.

Результати розрахунку НДС та переміщень (для прямої ділянки та гину) при жорсткому термомеханічному навантаженні представлені на Рис. 4.7 «а»-«в».

L: Copy of Copy of Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
Custom
Max: 2.9009e8
Min: 97730
11.04.2019 0:02

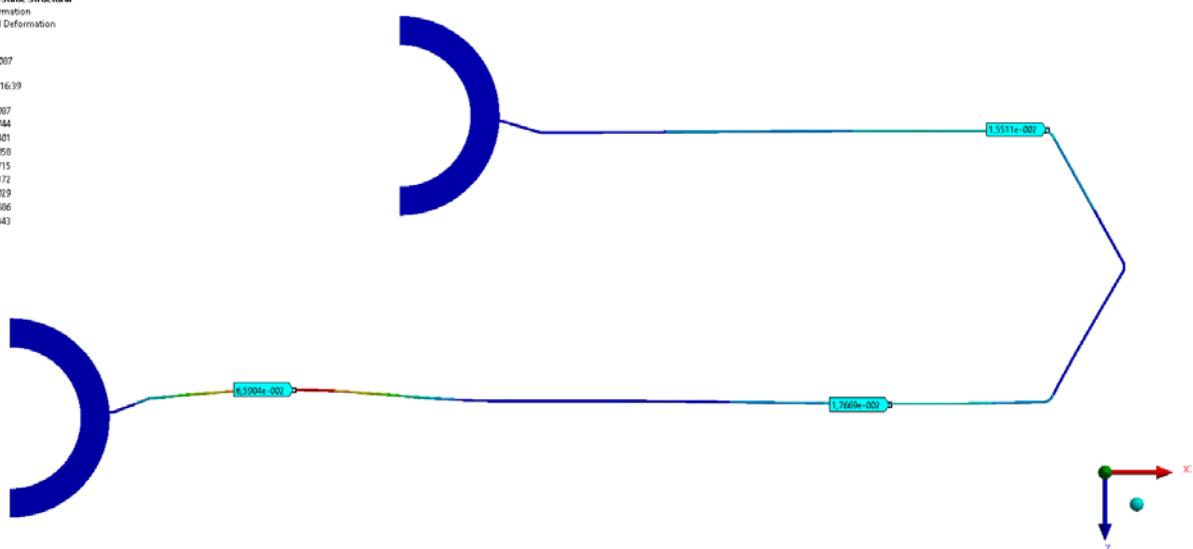
2.9009e8
2.5707e8
2.2564e8
1.9421e8
1.6278e8
1.3135e8
9.7730e7
6.4541e7
3.1319e7
97730



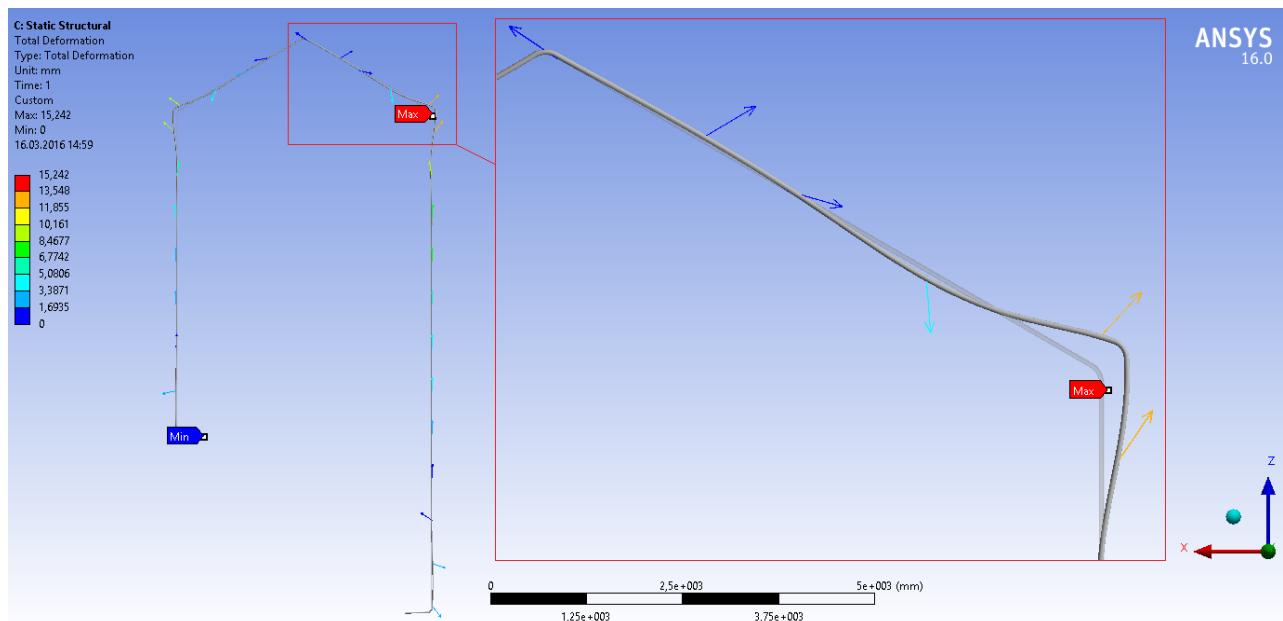
а) Напруження при жорсткому термомеханічному навантаженні

K: Copy of Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
Max: 0.066007
Min: 0
10.04.2019 16:39

0.066007
0.058744
0.051401
0.044058
0.036715
0.029372
0.022029
0.014666
0.007343
0



б) Переміщення прямої ділянки при жорсткому термомеханічному навантаженні

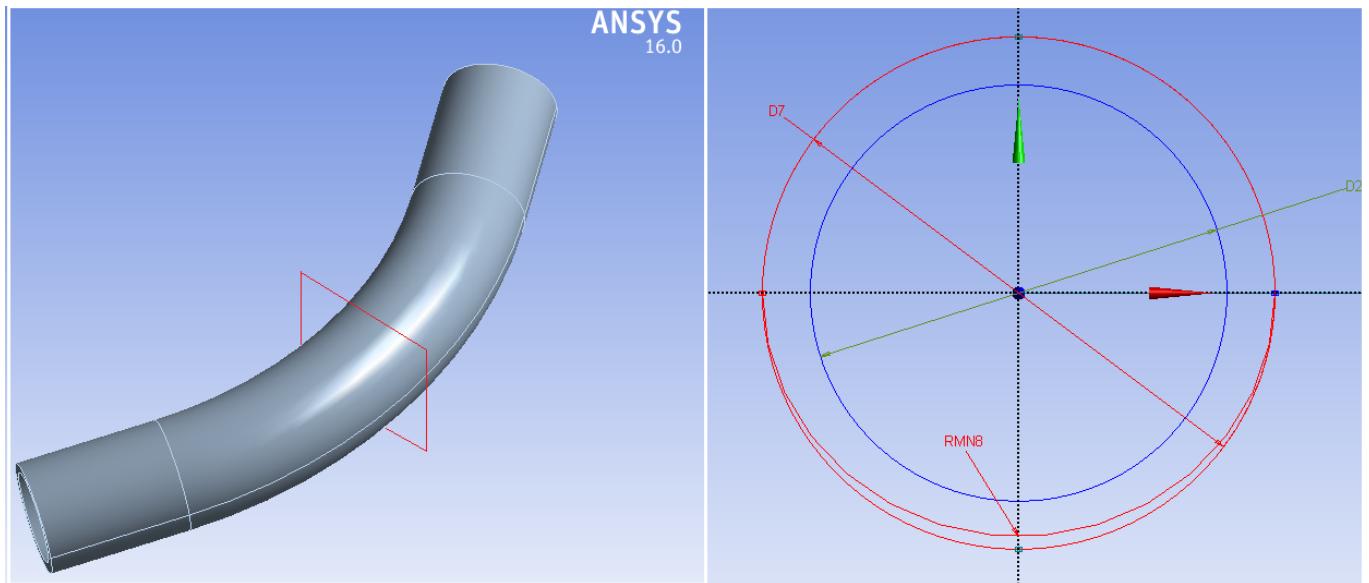


в) Переміщення гину при жорсткому термомеханічному навантаженні

Рис. 4.7 Результати розрахунку НДС та переміщень при жорсткому термомеханічному навантаженні

Аналіз НДС ТОТ при жорсткому термомеханічному навантаженні свідчить про те, що найбільш навантаженою ділянкою є згин. Далі досліджується найбільш напружена ділянка трубопроводу і для цієї ділянки 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 2.2.2, рівняння 2.29).

Дефект у вигляді локального потоншення стінки на згині ТОТ (Рис. 4.8) постулюється у місці локалізації максимальних напружень за результатами попереднього розрахунку.



Р

Рис. 4.8 Схема дефекту, що моделюється для 20% втрати металу

Аналіз НДС трубки теплообмінної поверхні з постульованим дефектом у вигляді потоншення у пружно-пластичній постановці (рівняння 2.29) виконано для степені потоншення стінок, що складають 20%, 50%, 60%, 65%, 70% та 80 %. За критерій міцності/цілісності в цьому випадку обрано «не перевищення границі міцності». Результати визначення НДС у графічному вигляді представлено на Рис.4.9 – 4.11 для випадків потоншення 20%, 50% та 80 %, а у табличному вигляді (Таблиця 4.3) для випадків 20%, 50%, 60%, 65%, 70% та 80 %.

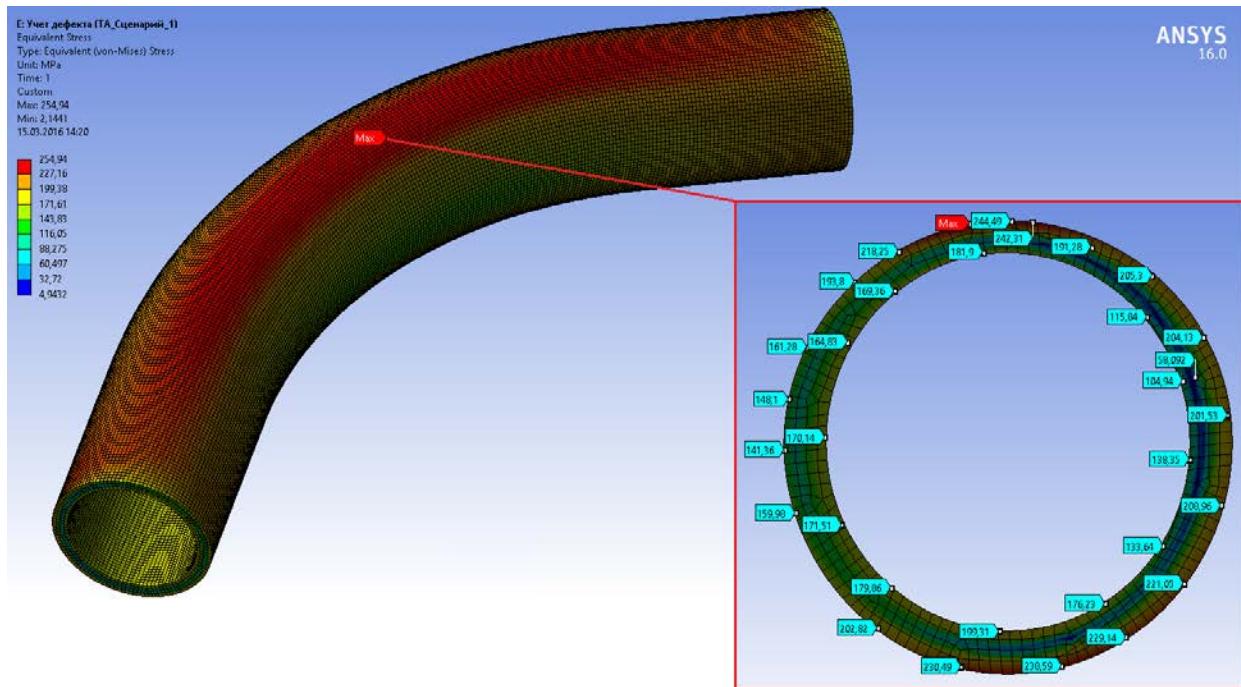


Рис. 4.9 НДС фрагменту трубки ТОТ з постульованим дефектом 20 %

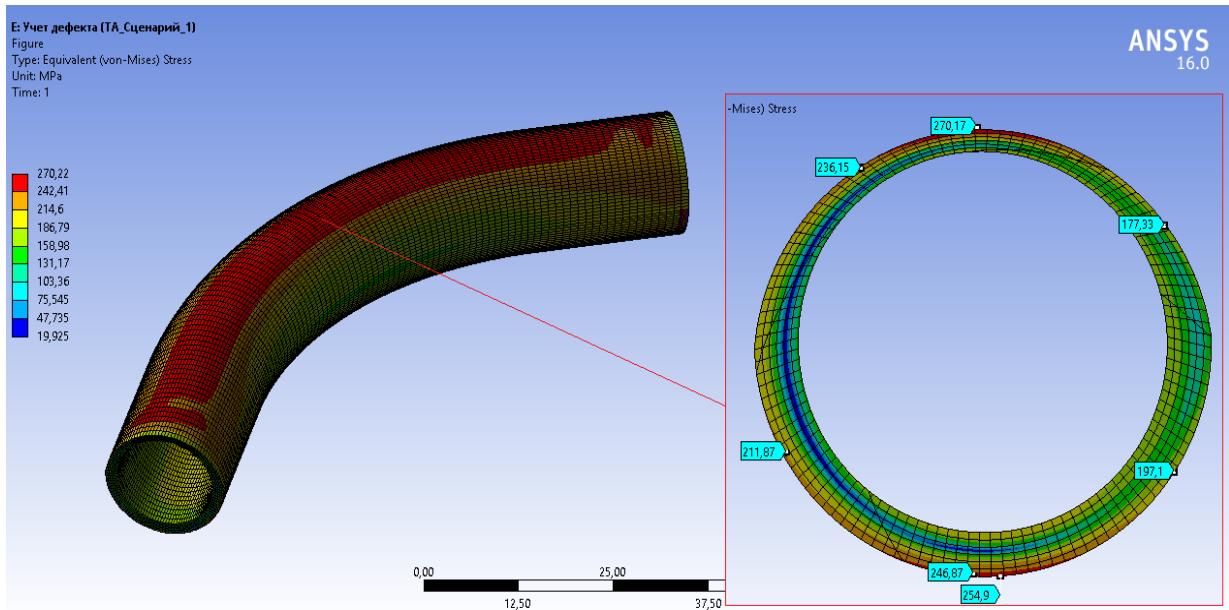


Рис. 4.10 НДС фрагменту трубки ТОТ з постульованим дефектом 50 %

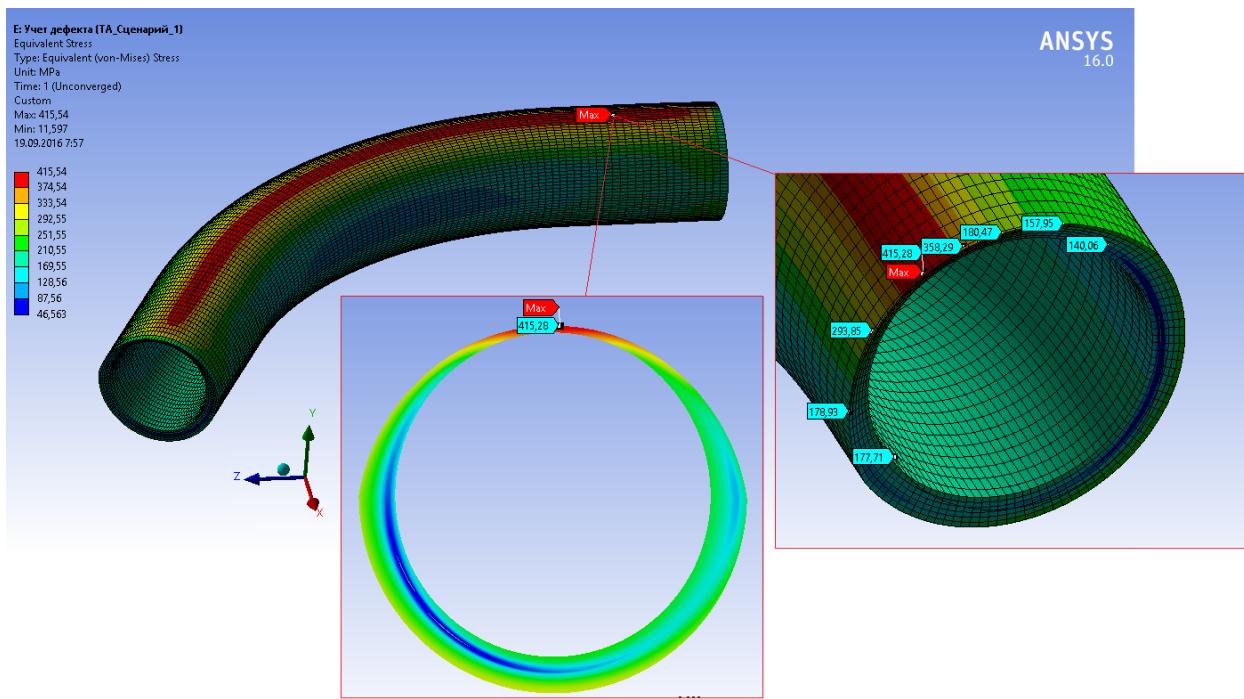


Рис. 4.11 НДС фрагменту трубки ТОТ з постульованим дефектом 80%

Таблиця 4.3 Максимальні значення напружень для потоншень 20%, 50%, 60%, 65%, 70% та 80 %

Ступінь потоншення	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження σ (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

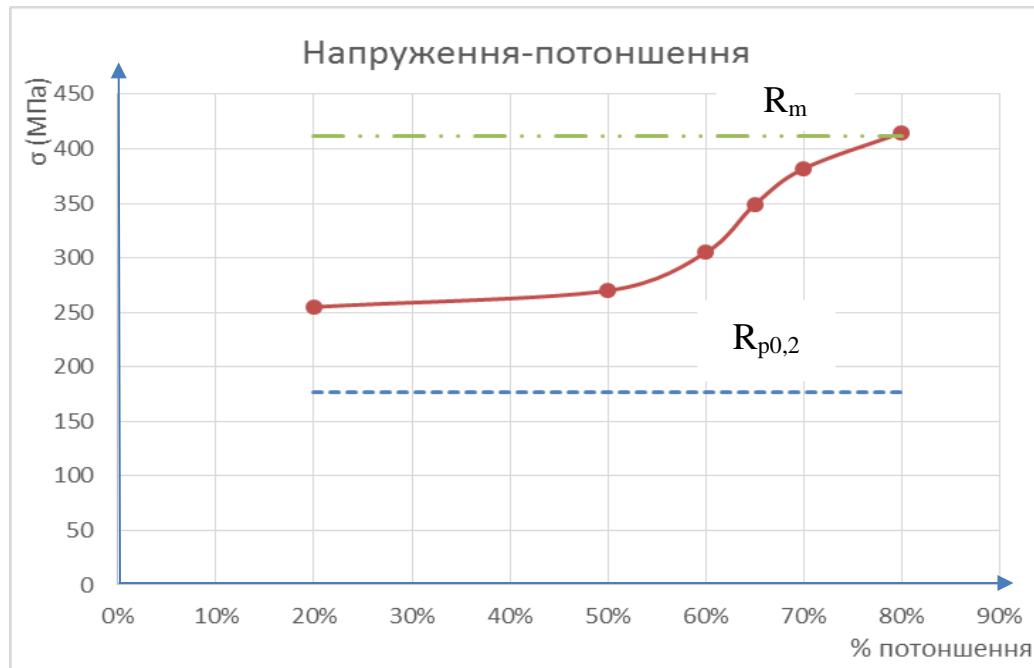


Рис. 4.8 Тренд зміни напруження в залежності від степені потоншення ТОТ

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 трубки теплообмінної поверхні в умовах аварії є 70% втрати матеріалу від товщини стінки.

При впливі «Термомеханічного навантаження 2», яке за умовами впливу є близьким до нормальних умов експлуатації ТОТ (див. розділ 2.2.2):

- для прямої ділянки цілісність трубки ТОТ зберігається при 80% втрати матеріалу
- для ділянки гину цілісність трубки ТОТ зберігається при 70% втрати матеріалу.

4.3 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 $R_{pT0,2}$.

Опір крихкому руйнуванню вважається дотриманим, якщо для обраного розрахункового дефекту у вигляді тріщини у режимі, що розглядається дотримується умова:

$$K_I < [K_I]$$

де, $[K_I]$ – допустиме значення коефіцієнта інтенсивності напружень (підхід до визначення $[K_I]$ викладено у розділі 2.2.1 цієї роботи).

Враховуючи картину локалізації екстремумів напружень і характер НДС у поперечному перетині, розташування тріщини прийнято перпендикулярно діючим окружним напруженням в зоні прямої ділянки і в зоні гину ТОТ.

Оцінку цілісності ТОТ на опір крихкому руйнуванню виконано для обох видів термомеханічного навантаження «1» та «2».

Результати розрахунку для «Термомеханічного навантаження 1»

Пряма ділянка

Модель прямої ділянки з тріщиною представлена на Рис. 4.9

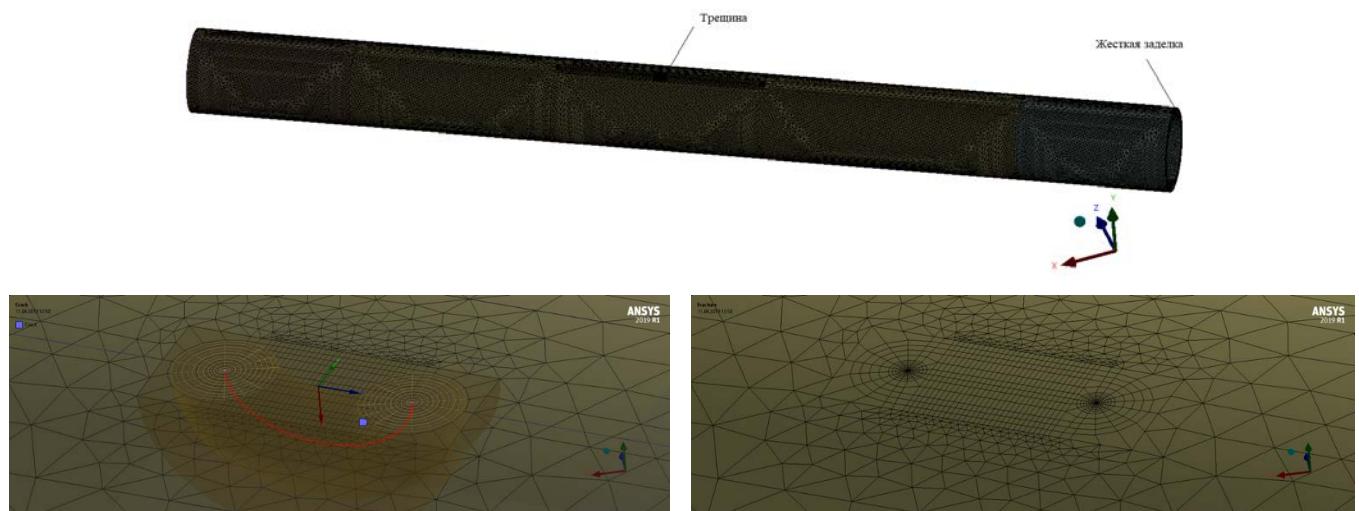


Рис. 4.9 Модель прямої ділянки ТОТ і тріщини

Кількість скінчених елементів – 309786.

Кількість вузлів – 571121.

Використано елемент типу SOLID187.

Тріщина - напівеліптична

Глибина тріщини - 25% від загальної глибини трубки

Мала напіввісь – 0,375мм

Велика напіввісь - 0,5625мм

Кількість елементів по фронту тріщини – 50, вузлів – 101.

Результати розрахунку КІН для «Термомеханічного навантаження 1» для прямої ділянки представлені на Рис. 4.10 та Рис. 4.11.

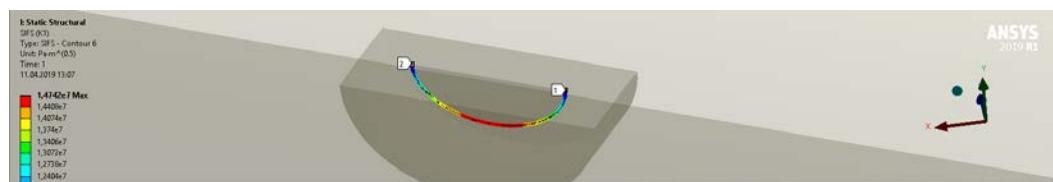


Рис. 4.10 Результати розрахунку КІН для прямої ділянки для «Термомеханічного навантаження 1»

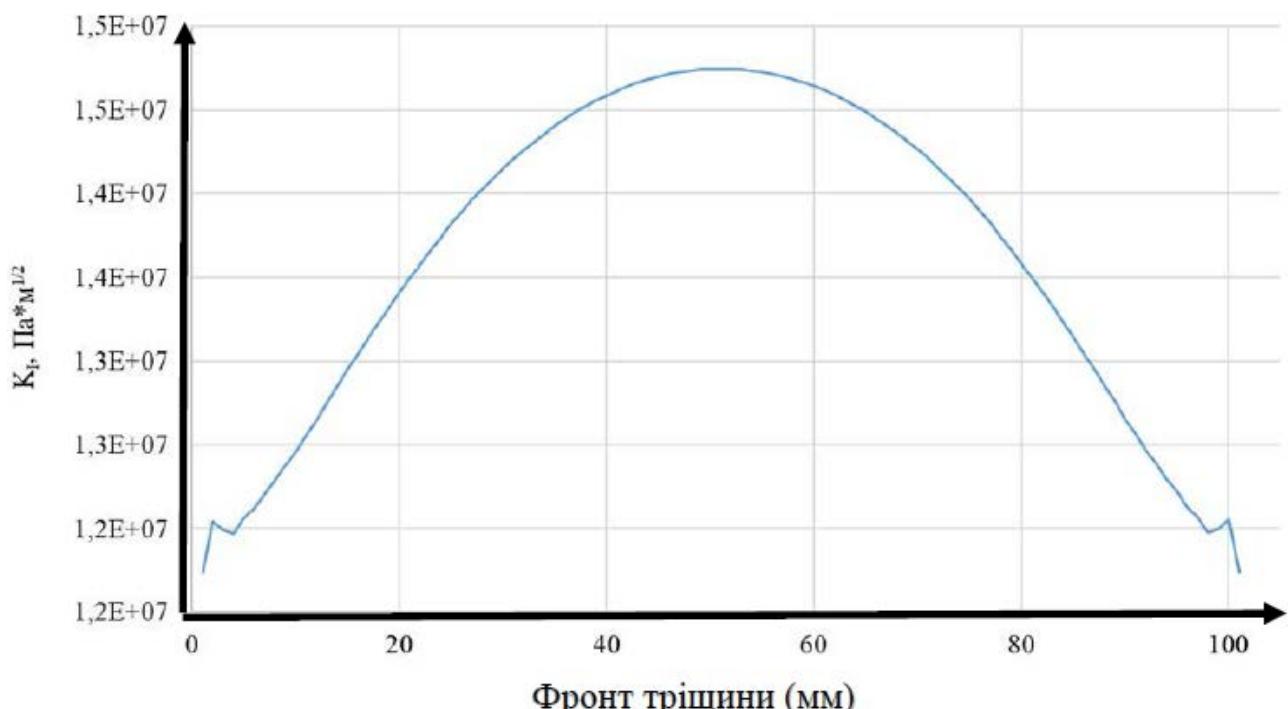


Рис. 4.11 Розподіл КІН по фронту тріщини для прямої ділянки для «Термомеханічного навантаження 1»

Максимальні значення КІН за результатами розрахунку складають:

$$K_{I\max} = 15,25 \text{ MPa} * \text{m}^{1/2}.$$

Гин

Модель гину з тріщиною представлено на Рис. 4.12

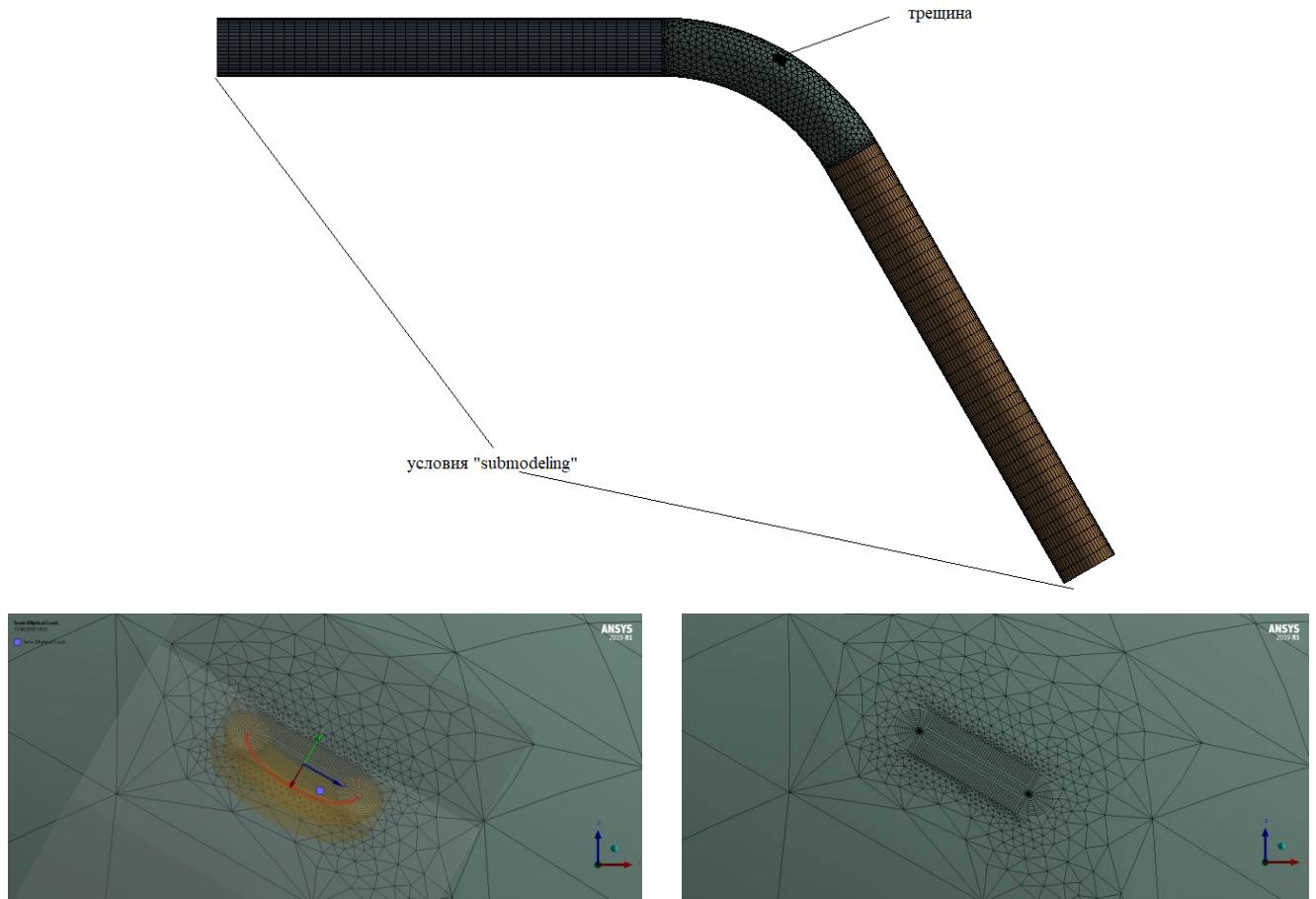


Рис. 4.12 Модель гину ТОТ і тріщини

Результати розрахунку КІН для «Термомеханічного навантаження 1» для гину ділянки представлені на Рис. 4.13 та Рис. 4.14.

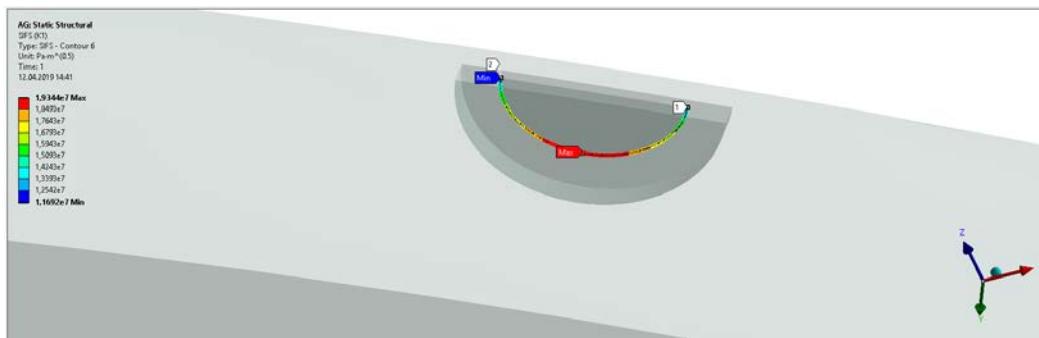


Рис. 4.13 Результати розрахунку КІН для гину
для «Термомеханічного навантаження 1»

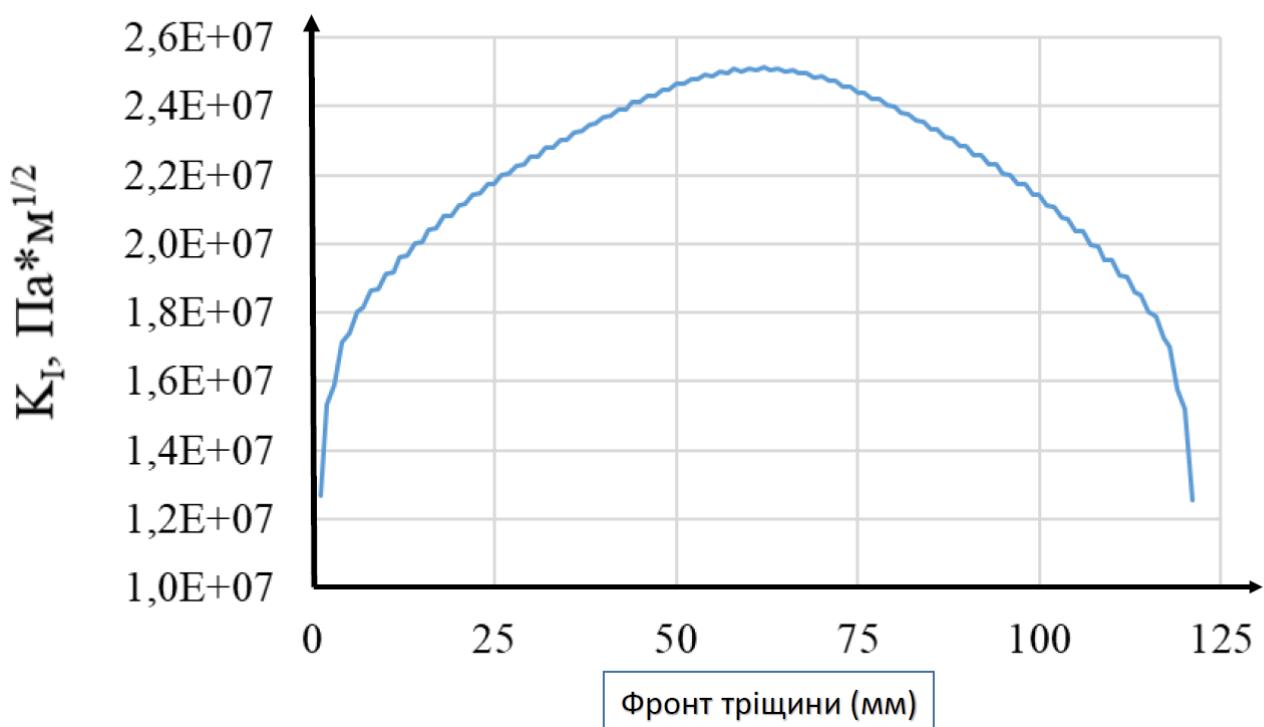


Рис. 4.14 Розподіл КІН по фронту тріщини для гину для «Термомеханічного навантаження 1»

Максимальні значення КІН за результатами розрахунку для гину для «Термомеханічного навантаження 1» складають:

$$K_{I\max} = 25,11 \text{ MPa} * \text{m}^{1/2}.$$

Результати розрахунку КІН по фронту тріщини для «Термомеханічного навантаження 2» представлена на Рис. 4-15 і Рис. 4-16 і свідчать про те, що максимальні значення КІН за результатами розрахунку складають: $K_{I,max} = 40 \text{ MPa} * \text{mm}^{1/2}$ ($1,29 \text{ MPa} * \text{m}^{1/2}$).

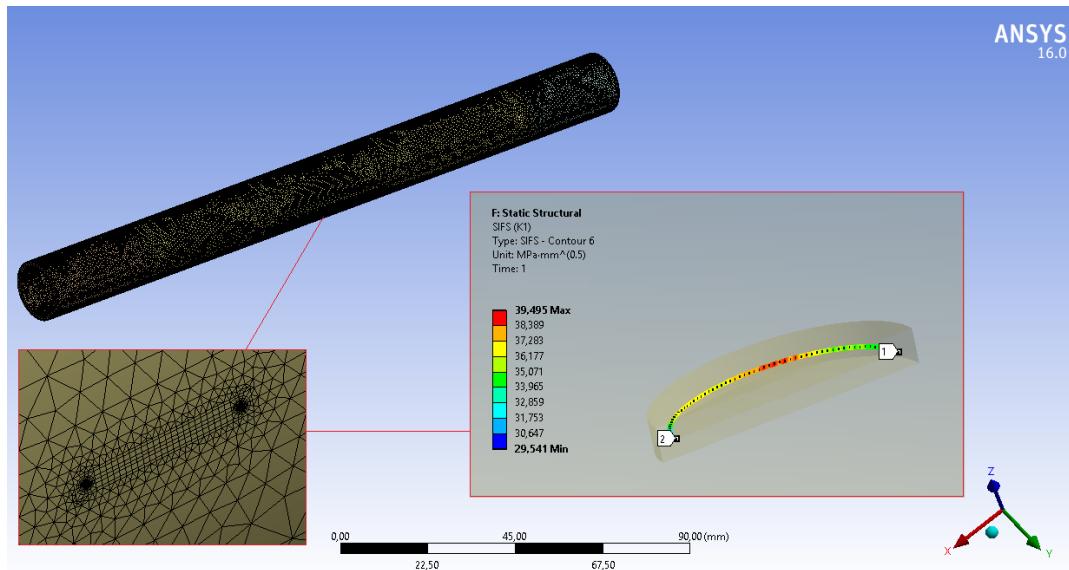


Рис. 4.15 - Розподіл КІН по фронту тріщини на зовнішній поверхні,
(МПа * мм^{1/2})

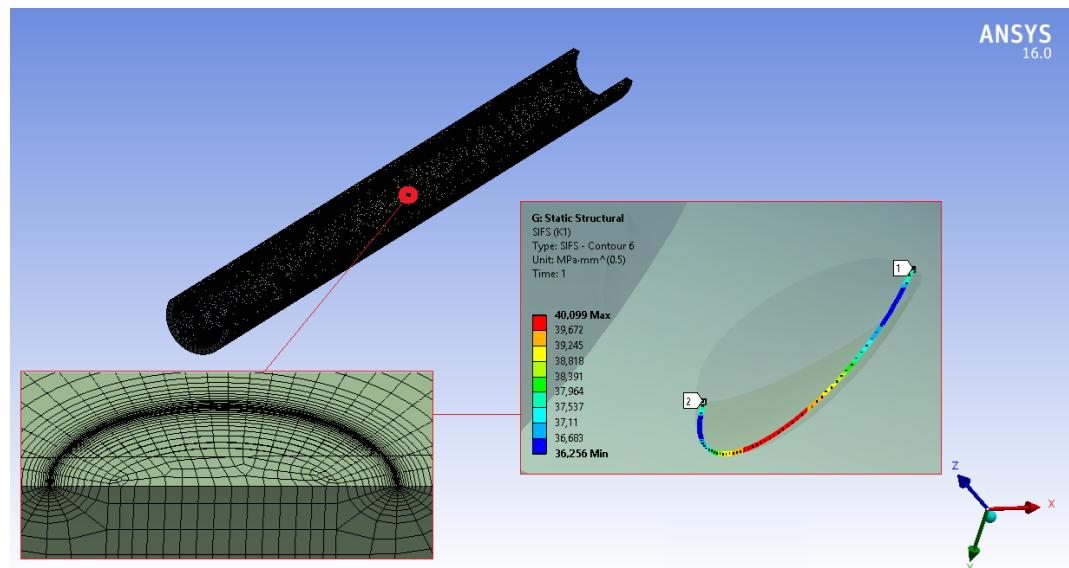


Рис. 4.16 - Розподіл КІН по фронту тріщини на внутрішній поверхні,
(МПа * мм^{1/2})

З урахуванням отриманих результатів розрахунку і зіставлення КІН (K_I) з допустимим ($[K_I]$) (допустиме значення КІН визначено у Розділі 2.2.1) загальна картина представлена у Таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Зіставлення розрахункового і допустимого КІН

КІН Тип навантаження	K_I (МПа \times м $^{1/2}$)		$[K_I]$
	Пряма ділянка	Гин	
Термомеханічне навантаження 1	15,25	25,11	55
Термомеханічне навантаження 2	1,29	1,31	

Як видно із Таблиці 4.4 умови крихкої міцності задовольняються із суттєвим запасом в обох випадках термомеханічного навантаження, і це є зрозумілим, оскільки ТОТ є циліндричною оболонкою середньої товщини, стінка якої миттєво прогрівається/охолоджується і це суттєво зм'якшує наслідки термосилового навантаження в умовах аварії. При цьому тріщину обрано, як найгіршу, на чверть глибини стінки трубки.

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.

Висновки по розділу 4

У Розділі 4 досліджено поведінку ТОТ ПГ для оцінки їх цілісності в умовах підживлення зсушеного ПГ, що призводить до суттєвого термомеханічного навантаження.

При оцінці НДС трубчатих елементів ПГ при аварійних ситуаціях в якості граничних початкових умов по температурі трубочки на момент організації підживлення, параметрів у першому та другому контурі, а також температури

охолоджуючої води використані результати теплогідравлічного аналізу, які розроблені та представлені українською аналітичною групою. В якості найгіршого аварійного сценарію розглянуто таку подію як «Повне знеструмлення енергоблоку».

Цей аварійний сценарій та його вплив на НДС трубчатки відстежено для різних температурних впливів і умов термомеханічного навантаження.

З урахуванням викладеного, оцінку НДС виконано для наступних граничних випадків:

- «Термомеханічне навантаження 1 (жорстке)» – температуру на зовнішній поверхні ТОТ прийнято 5°C , а на внутрішній 300°C ;
- «Термомеханічне навантаження 2» – температуру охолоджуючої води в області трубчатки на зовнішній поверхні прийнято у діапазоні $278\text{--}295^{\circ}\text{C}$, а на внутрішній 300°C .

Значення коефіцієнтів тепловіддачі та температури в залежності від часу отримано на підставі результатів теплогідравлічного аналізу з використанням спеціалізованого програмного засобу RELAP5 [92].

З урахуванням визначених вище умов термомеханічного навантаження аналіз НДС і оцінку цілісності ТОТ виконано для найбільш навантаженої прямої ділянки і гину за наявності на цих ділянках нерегулярності геометрії або тріщини. Результати аналізу НДС та оцінки цілісності ТОТ при самих несприятливих умовах термомеханічного навантаження дозволяють зробити висновок про те, що:

- 1) за умови наявності нерегулярності геометрії (для потоншень 20% , 50% , 60% , 65% , 70% та 80%) граничним значенням потоншення, при якому виникає порушення цілісності поверхні ТОТ в умовах аварії є 80% втрати матеріалу від товщини стінки (для гину, як найбільш навантаженого елементу);
- 2) 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.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі щодо визначення НДС трубчатих елементів ПГ та оцінки їх цілісності з урахуванням фактичного технічного стану в умовах жорсткого термомеханічного навантаження 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 дефекту у вигляді потоншення (еліпсоїд, еліптичний конус та еліптичний параболоїд), які надають можливість адекватно відобразити форму реального дефекту. Встановлено, що найбільш оптимальною для моделювання дефекту (потоншення), з погляду напружень, які виникають, є поверхня еліпсоїду, для якого об'єм порожнини дефекту є найбільшим $V = \frac{2}{3} Fh$. В подальших розрахунках, при геометричному моделюванні поверхонь з дефектами у вигляді потоншення перевагу надано саме поверхні еліпсоїду.
- 3) Вивчено вплив дефектів у вигляді тріщини і нерегулярності геометрії (обумовлено наявністю дефектів у вигляді потоншення стінки) ТОТ на її НДС. Визначено вплив ступеню небезпеки цих дефектів на міцність ТОТ. Проведений чисельний аналіз по визначення допустимо мінімального потоншення стінки ТОТ згідно Методики [153], вказує на те, що використання лінійних консервативних методів без врахування температурних напружень може привести до небажаних результатів. Так, коли не визначається глобальний НДС ТОТ, номінальне розрахункове напруження для прямої ТОТ і в зоні гину не перевищує граници плинності матеріалу ТОТ при 60% потоншення стінки ТОТ. У випадку, коли

враховується дія внутрішнього тиску і пластичного послаблення від дії згинального моменту, номінальне розрахункове напруження в зоні згину перевищує границю плинності матеріалу ТОТ при 50% зносу стінки ТОТ. Таким чином, є підстави обґрунтовано стверджувати, що досконалій аналіз напружень в ТОТ в зоні дефекту бажано визначати з допомогою теорії пружнопластичності. Для цього вибрана система диференційних рівнянь, які описують пружнопластичний стан оболонок обертання змінної товщини з довільною формою меридіана при дії віссиметричних силових і теплових навантажень. Визначена діаграма деформування матеріалу трубок ТОТ в пружнопластичній області. З урахуванням зазначеного підходу проведено ітераційні розрахунки НДС ТОТ з метою визначення мінімально допустимого потоншення стінки ТОТ на прямій ділянці і в області гину (розрахунки проведені у пружній та пружно-пластичній постановці).

4) Для визначення НДС ТОТ за наявності дефектів (у вигляді локальних потоншень та тріщини) адаптовано математичне забезпечення, яке засновано на використанні класичної теорії оболонок і створено розрахункову модель ТОТ. Визначення НДС ТОТ з постулюваною несуцільністю в лінійній постановці (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 тріщини в трубчатих елементах парогенераторів 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, термін експлуатації яких наближається до вичерпання проектного ресурсу.

За результатами досліджень встановлено, що найбільш впливовим типом пошкодження трубчатих елементів є втрата металу через дію корозійних та ерозійних процесів. Ця ситуація погіршується тим, що через складні термомеханічні умови експлуатації ПГ та скучення шламу на трубчатці ПГ діють додаткові навантаження, які збігаючись із поточним технічним станом трубчатки ПГ, ресурс якого наближається до вичерпання, призводять до питання, а як саме буде вести 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;
- розробці науково-технічного звіту «Технический отчет «Оценка целостности теплообменных трубок парогенераторов третьего энергоблока Ровенской АЭС во время управления аварией», що виконаний за договором №6F-30301 між ТОВ «UCHICAGO ARGONE» та ДП «ДНТЦ ЯРБ».

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Сотсков В.В., Харченко С.А. Прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Обеспечение безопасности АЭС», вып. 17. Реакторные установки с ВВЭР. Подольск, 2007, с. 15-34.
2. Головко К.Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / К.Г.Головко, П.З.Луговой, В.Ф.Мейш. – К: Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2012. – 541 с.
3. Луговой П.З., Мейш В.Ф., Штанцель Э.А. Нестационарная динамика неоднородных оболочечных конструкций. – К.: Изд. Полигр. центр «Киевский ун-т», 2005. 536 с.
4. Noor A.K. Recent Advances in Reduction Methods for Instability Analysis of Structures. – Computers and Structures, 1983, Vol. 16, № 1– 4, –P. 67–80.
5. Гайдайчук В.В., Носенко В.П., Худолій С.М. Механіка конструкцій вітроенергетичних установок. Київ: Видавництво Аграр Медіа Груп, 2013. – 263с.
6. Луговой П.З., Мукоид В.П., Мейш В.Ф. Динамика оболочечных конструкций при взрывных нагрузках. Киев: Наук. думка, 1991. – 280 с.
7. Carrera E., “Theories and Finite Elements for Multilayered, Anisotropic, Composite Plates and Shells,” Journal of Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 9, №. 2, 2002, –P. 87-140.
8. Ya.M., Grigorenko A.Ya., Vlaikov G.G. Problems of mechanics for anisotropic inhomogeneous shells on the basis of different models. – Kiev:S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, Technical center of the National Academy of Science of Ukraine, 2009. – 550p.
9. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, Р31 матеріали, конструкції, моделі / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко, Т. В. Потаніна та ін. ; за ред. О.В. Єфімова. – Харків : ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.
10. Махутов Н.А., Драгунов Ю.Г., Фролов К.В., Горбатых В.П., и др. Несущая

способность парогенераторов водо-водяных реакторов. Под общей ред. чл. – корр. РАН Н.А. Махутова. – М.: «НАУКА», 2003. 440 с.

11. Лукасевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 391 с.: ил.

12. Федоров Л.Ф., Титов В.Ф., Рассохин Н.Г. Парогенераторы атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1992. - 416 с.

13. Tatone O.S., Pathania R.S. Learning lesson of steam generators operating experience // Nuclear Engineering International. 1983. September. P. 29-33.

14. Алгоритмізація та програмування розрахунку горизонтального парогенератора для імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 / Т.В. Потаніна, О.В. Єфімов, О.Д. Меншикова [та ін.] // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація». – Львів : НУ «Львівська політехніка». – 2006. – № 561. – С. 3–7.

15. Северин В. П. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Вісник Національного тех-нічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 19. – С. 145-150.

16. Временная методика уточненного расчета на прочность и ресурса коллекторов парогенераторов ПГВ-1000. Руководитель разработки чл.-корр. РАН Н.А. Махутов.- М.: ИМАШ АН СССР, 1990.- 56 с.

17. Москвичев В.В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений. Новосибирск: Наука, 2002, –106 с.

18. Драгунов Ю.Г., Петрова О.Ю., Лякшпев С.Л., Харченко С. А. ОКБ «Гидропресс»; Харина И.Л., Зубченко А.С. «ЦДИИТМАШ». Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000 (1000 М) // Атомная энергия. Том 104, вып. 1, январь 2008, с. 32-38.

19. Харченко С.А., Лякшпев С.Л., Денисов В.В., Петрова О.Ю. Анализ

факторов, приводящих к повреждению коллекторов парогенератора ПГВ-100М. Сборник ВАНТ, серия: "Обеспечение безопасности АЭС", вып. 19, 2007, с. 55-68.

20. Matocha K., Wozniak J. Analysis of WWER 1000 Collector Cracking Mechanism. Steam generators repair and replacement // Proceedings of IAEA specialists meeting. Ostrava. Chech Republic, 1996. P. 284-316.

21. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок М.: Энергоатомиздат. 1989. 524 с.

22. Єфімов О.В. Конструкції, матеріали, процеси і розрахунки реакторів і парогенераторів АЕС: навч. посіб. / О.В. Єфімов, М.М. Пилипенко. – Х. : НТУ «ХПІ», 2009.– 307 с.

23. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. -М.: Машиностроение, 1990. 448 с.

24. Когаев В.П., Махугов НА, Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М: Машиностроение, 1985, – 224 с.

25. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. – М.: Энергоиздат, 1989. – 304 с.

26. Теплоэнергетика и теплотехника. Справочник. Под ред. Клименко А. В., Зорина В.М. Книга 1. М.: МЭИ, 1999. - 528 с.

27. Справочная серия. «Правила и нормы в атомной энергетике». Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.-М.:Энергоатомиздат, 1989.- 525 с.

28. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990. - 360 с.

29. Кирилов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов, Ю.Г. Юрьев, В.П. Бобков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 358 с.

30. Рыжов Д.И., Майборода Е.Е., Крицкий В.Б., Шугайло А.П. Сравнительный

анализ нормативных документов по сейсмическому проектированию АЭС, действующих в Украине и России // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, №4, 2002, – С. 47–53.

31. Кондратьев С.Н., Крицкий В.Б., Прабхакара М., Рыжов Д.И., Шугайло А.П., Шугайло А-р.П. Оценка эффективности антисейсмических мероприятий в проекте стабилизации объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – Киев: ГНТЦ ЯРБ, №1, 2004, – С. 96 –100.

32. Крицкий В.Б., Рыжов Д.И., Шугайло А.П. Опыт анализа мероприятий по обеспечению сейсмостойкости нетипичных строительных конструкций при проведении технической оценки рабочего проекта по стабилизации объекта «Укрытие» // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції». – 2005 – Т.2. – С. 34-40.

33. Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Шугайло А-р.П., Шугайло А.П. Анализ современного состояния нормативной базы Украины по обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций и оборудования ядерных установок // Міжвідомчий науково–технічний збірник наукових праць „Будівельні конструкції” Випуск № 64 2006, – С. 140 – 146.

34. Крицкий В.Б., Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Шугайло А-р.П., Шугайло А.П. Проблемные вопросы в нормативной базе Украины по обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций, систем и элементов ядерных установок // Ядерна та радіаційна безпека. – 2006 – Т.9, вип. 2. – С. 34-40.

35. Майборода Е.Е., Рыжов Д.И., Крицкий В.Б., Леткова Н.Г., Шугайло Ар.П., Шугайло А.П. О необходимости проведения исследований сейсмической опасности площадок АЭС Украины с использованием современных международных требований и подходов // Зб. наук. праць СНУЯЕтаП. – 2007 № 3, (23) – С. 155-164.

36. Рижов Д. І., Шугайло О. П., Шугайло О-р П., Крицький В. Б., Бойчук В.С., Буряк Р.Я. Аналіз доцільності перегляду національних регулюючих документів стосовно локалізуючих систем безпеки атомних станцій на основі їх порівнянь з

європейскими стандартами // Ядерна та радіаційна безпека. – 2009 – Т.12, вип. 3. – С. 15 – 19.

37. Рижов Д. І., Шугайло О. П., Шугайло О-р П., Буряк Р.Я. , Хамровська Л.В., Крицька Н.І. Огляд сучасних підходів до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної небезпеки енергоблоків АЕС// Ядерна та радіаційна безпека. – 2012. № 4. – С. 23– 26.

38. Рыжов Д. И., Шугайло А. П., Кендзера А.В., Инюшев В.В.,Шугайло А-р П., Буряк Р.Я. Применение современных международных подходов к оценке сейсмической опасности площадок АЕС Украины // Ядерна та радіаційна безпека. – 2013, Т. 59, вип. 3. – С. 16– 20.

39. Рижов Д. І., Шугайло О. П., Шугайло О-р П., Кендзера О.В., Мар'єнков М.Г., Шендерович В.Я., Буряк Р.Я. Про сучасні вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій України // Ядерна та радіаційна безпека. – 2017, № 2. – С. 9 – 13.

40. Крицкий В.Б. Рыжов,Д.И., Шугайло А.П. Анализ сейсмостойкости и оценки сейсмических рисков Чернобыльской АЭС // Ежегодная конференция Международного чернобыльского центра "1998: Международное сотрудничество Чернобылю". Славутич, МЧЦ, 1998, – С. 98.

41. Акользин П.А., Герасимов В.В. и др. Локальная коррозия металла теплоэнергетического оборудования. Под общей ред. Горбатых В.П.- М.: Энергоатомиздат, 1992.- 272 с.

42. Исследование характеристик работоспособности стали марки 10ГН2МФА ЭШП в условиях эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000// Технический отчет по теме 574д-88, ЦНИИ КМ "Прометей",Л., 1990, 63с.

43. Рассохин Н.Г., Горбатых В.П., Середа Е.В., Абрашов В.А. Физико-химические аспекты надежности теплообменных труб из austenитных хромоникелевых сталей// Теплоэнергетика. – 1988. –N 11. – С. 19-24.

44. Абрашов В.А., Горбатых В.П., Морозов А.В., Сааков Э.С. Концепция

прочности металла: долговечность // Вестник МЭИ. Изд-во МЭИ. -1996.-№3. С. 63–71.

45. Серебряков Ан. В., Мальцев В.В., Оборотова Н.М. и др. Проблемы теплообменных труб для АЭС. Задачи и пути решения по повышению эксплуатационных свойств теплообменных труб // 8-ой международный семинар погоризонтальным парогенераторам, ФГПУ ОКБ. «ГИДРОПРЕСС» г. Подольск. 2012.

46. Иванова В.С. Разрушение металлов. -М.: Металлургия, 1979. – 166 с.

47. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита металлов от коррозии. -М.: Металлургия, 1974. 232 с.

48. Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.

49. Герасимов В.В., Монахов А.С. Материалы ядерной техники. 2 – е изд. –М.: Энергоиздат, 1982. – 288 с.

50. Герасимов В.В. Коррозия реакторных материалов. М.:Атомиздат, 1980, 250 с.

51. Марголин Б.З., Курсевич И.П., и др. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР, Сообщение 1, Связь радиационного распухания с радиационным охрупчиванием – экспериментальные результаты // Проблемы прочности. – 2009 – №6. – с. 5 –16.

52. IAEA-TECDOC-1557. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Vessel Internals, 2007 Update. – Vienna: IAEA, 2007. – 65p.

53. Aithal R., Gipson G. Steven. Instability of internally damped curved pipes // J. Eng. Mech. – 1990. – 116, 1. – P. 77 – 90.

54. Cui Hongwu, Tani Junji. Flatter robust – control of a pipe conveying fluid // Trans. Eng. C. – 1994. – 60, № 579. – p. 3789 – 3793.

55. Cui Hongwu, Tani Junji. Effect of boundary conditions on the stability of a

cantilever piper discharging and aspirating fluid // ASME Int. J. C. – 1996.– 39, № 1. – P. 20 – 24.

56. Dupuis C., Rousselet J. The equations of motion of curved pipes conveying fluid // J. Sound and Vibr. – 1992. – 153, № 3. – P. 473 – 489.

57. Hayashi Satoru, Tanba Masataka, Hayase Toshiyuki. Self – excited vibration occurring in collapsible tubes: Analysis by lumped parameter model // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B. – 1994. – 60, #579. – P. 3636 – 3641.

58. Dupuis C., Rousselet J. Hamilton's principle and the governing equations of fluid – conveying curved pipes // J. Sound and Vibr. – 1993. – 160, № 1. – P. 172 – 174.

59. Овчинников В.Ф., Смирнов Л.В. Динамические свойства трубопровода с движущейся жидкостью // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1981. Вып. 6. – С. 6 – 16.

60. Гуляев В.И., Толбатов Е.Ю., Абдуллаев Ф.Я. Динамическая неустойчивость трубы с внутренними жидкостными пробками // Пробл. прочности. – 1999. – № 3. – С. 114 – 121.

61. Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Дяденчук Ю.Н. Нелинейное деформирование трубчатой винтовой спирали, взаимодействующей с внутренним неоднородным потоком жидкости // Прикл. механика. – 1991. 37. № 4 – С. 17 – 24.

62. Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Котенко Е.Э., Жабер Х.Н. Динамика упругих трубчатых спиралей, взаимодействующих с внутренними подвижными жидкостными пробками // Прикл. механика. – 1994. 40 № 7 - С. 37 – 45.

63. Гуляев В.И., Толбатов Е.Ю. Предрезонансные и резонансные упругие колебания спиральных труб, взаимодействующих с внутренними подвижными жидкостными пробками // Прикл. механика. – 1999. 45 № 1 - С. 85 – 91.

64. Гуляев В.И., Толбатов Е.Ю. Численное моделирование динамики упругих трубчатых спиралей с внутренними неоднородными потоками вскипающей жидкости// Пробл. прочности. – 2001. – № 4. – С. 87 – 96.

65. 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.

66. Рыжов Д. И., Шугайло А. П., Шугайло А-р П., Инюшев В.В., Буряк Р.Я., Хамровская Л.В. Результаты выполнения технической оценки материалов эксплуатирующей организации по квалификации оборудования энергоблоков №№ 1,2 Ровенской АЭС // Ядерна та радіаційна безпека. –2011, № 4. – С. 11– 17.

67. Громов Г.В., Дыбач А.М., Зеленый О.В., Инюшев В.В., Носовский А.В., Шоломицкий С.Э., А-й.П. Шугайло, Гашев М.Х., Бойчук В.С. Результаты экспертной оценки стресс – тестов действующих энергоблоков АЭС Украины с учетов уроков аварии на АЭС «Ф ОКУСИМА – 1» в Японии. / Ядерна та радіаційна безпека. – 2012, № 1. – С. 3 – 9.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. Власенко Н.И., Козлов В.Я. Эффективность внедренных мероприятий по повышению надежности парогенераторов ПГВ-1000М АЭС Украины // Седьмой международный семинар по горизонтальным парогенераторам. ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС» г. Подольск 3-5 октября 2006.

73. Пути повышения надежности парогенераторов на энергоблоках АЭС с реактором ВВЭР / В.И. Бараненко, С.Г. Олейник, Г.Н. Филимонов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2005. – № 12. – С. 23–29.

74. Trunov N. B. , Dragunov Yu. G. Optimization of the Tube – Bundle Arrangement in Horizontal Steam Generators // Atomic Energy. 2004, Volume 97, Issue 1, – P. 450–458.

75. Авдеев А..А., Зудин Ю.Б., Рясный С.И. Анализ и оценка теплогидравлических процессов в патрубке питательной воды парогенератора ПГВ – 1000. "Теплоэнергетика", № 1, 2004, – С. 52-55.

76. Красовский А.Я., Орыняк И.В. Прочность и надежность трубопроводных систем // Пробл. прочности. – 2010, N5. – С.174 – 186.

77. Красовський А.Я., Ориняк I.В., Тороп В.М. Методологія і експертна система поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу і безпеки експлуатації // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: Ін–т електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, 2006. – С. 309 – 314.

78. Стандарт эксплуатирующей организации СТО 0281-2006. Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций, «Росэнергоатом», 2006.- 49 с.

79. Давиденко Н.Н., Березанин А.А., Усанов Д.А., Немытов Д.С., Щелик С.В. Мониторинг эксплуатационных состояний ПГ. Безопасность АЭС и подготовка кадров-2007:тез. докл. X Международная конференция.-г.Обнинск. 1-4 октября, 2007 г. С-110.

80. Березанин А.А., Давиденко Н.Н., Усанов А.И. Применение систем

диагностики для контроля состояния тепломеханического оборудования// Теплоэнергетика.-2009.- №5.-С.-7-11.

81. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: «Машиностроение», 1990. – 448 с.

82. Бакиров М.Б., Клещук С.М., Богданов Е.А., и др. Подходы к управлению ресурсом теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР // Седьмой международный семинар по горизонтальным парогенераторам. ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС» г. Подольск 3-5 октября 2006.

83. Трунов Н.Б., Давиденко С.Е., Попадчук В.С. и др. Современное состояние проблемы управления ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР. «Теплоэнергетика». №3, 2011, с. 6-10.

84. Немытов Д.С. Влияние эксплуатационных и конструкционных факторов на ресурс теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000. Диссертация канд. техн. наук - Москва, 2009.

85. Трунов Н.Б. Надежность и ресурс трубчатки парогенераторов АЭС с ВВЭР / Н.Б.Трунов, С.Е.Давыденко, В.В.Денисов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Выпуск 9. Реакторные установки с ВВЭР. Подольск, 2005. С.45-54.

86. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. -М.: Энергоатомиздат, 2001. 318 с.

87. Hyuvarinen J., Kouhia J. Experimental verification of the horizontal steam generator boil-off heat transfer degradation // Proceedings of fourth international seminar on horizontal steam generators. Lappeenranta. Finland, 1997. P. 1-14.

88. Ubra O., Doubek M. Horizontal steam generator PGV–1000 thermal-hydraulic analysis // Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators. Lappeenranta. Finland, 1995. – P. 107–117.

89. Ремжин Ю.Н. Основы компоновки и теплового расчета парогенераторов

атомных электростанций / Ю.Н. Ремжин, В.А. Слабиков. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1981. – 191 с.

90. Королев, А. В. Резервная подпитка парогенераторов АЭС в условиях электрообеспечивания энергоблока / А. В. Королёв. О. В. Деревянко // Ядерна та радіац. безпека. - 2014. - Вип. 2 (62). - С. 10-12.

91. https://www.researchgate.net/publication/299725594_Thermal_hydraulic_system_of_a_VVER-1000_nuclear_reactor_and_numerical_simulations.

92. Расчетный комплекс «RELAP», разрешенный к использованию в ГП НАЭК «Энергоатом» (введено в дію розпорядженням ДП «НАЕК «Енергоатом» від 05.02.2018 № 137-р)

93. https://www.researchgate.net/publication/229349781_A_visual_environment_for_system_analysis_codes.

94. Фраас А., Оцисик М. Расчет и конструирование теплообменников / – М.: Атомиздат, 1971. – 328 с.

95. Гетман А.Ф., Козин Ю.Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. М:Энершатомиздат,1997,287с.

96. Давиденко С.Е., Трунов Н.Б., Григорьев В.А. и др. Совершенствование контроля и ремонта теплообменных труб ПГ АЭС с ВВЭР // Сборник Вопросы атомной науки и техники. 2005.

97. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихревокового метода неразрушающего контроля / – М. : Спектр, 2014 . – 288 с.

98. Carlson P.A., Kratzer W.K. N Reactor steam generator performance // Nuclear technology. 1976. Vol. 28. №3. P. 383-387.

99. Давиденко С.Е. Разработка и внедрение руководящих документов по проблемам контроля теплообменных труб парогенераторов РУ с ВВЭР // Годовой отчет АО ОКБ “Гидропесс” за 2013г. Вып. 14.

100. Коба К. Особливості методології IDEFO на АЕС // Енергоатом України – 2017, № 2(45). – С. 58 – 61.

101. Казаров Г.И., Горбатых В.П., Сааков Э.С., Шейкин Л.Г. Оценка коэффициента концентрирования примесей воды в отложениях при кипении // Теплоэнергетика. 1994. – №4. – С.66-68.
102. Горбатых В.П., Иванов С.О. Физико-химические процессы на АЭС. Термины и определения. Учебное пособие (справочное). -М.: МЭИ, 2007. 40с.
103. Харитонов Ю.В., Брыков С.И., Трунов Н.Б. Прогнозирование накопления отложений продуктов коррозии на теплообменных поверхностях парогенератора ПГВ-1000М // Теплоэнергетика. 2001. №8. С 20-22.
104. Мамет В.А., Мартынова О.И. Процессы «хайд-аут» (местного концентрирования) примесей котловой воды парогенераторов АЭС и их влияние на надежность работы оборудования // Теплоэнергетика. 1993. №7. С. 2-7.
105. Карзов Г.П., Суворов С.А., Федорова В.А., Филиппов А.В., Трунов Н.Б., Попадчук В.С., Жуков Р.Ю. «Динамика зарождения и развития повреждений теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 в рабочих режимах» // Труды 9-й Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании и эксплуатации оборудования АЭС», ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Пушкин — Санкт-Петербург, Россия, 6-8 июня 2006 г.
106. Splichal K., Mikus M., Petrecky I. et al. Effect of water chemistry on WWER steam generator corrosion damage // Proceedings of IAEA. Specialists meeting, Ostrava. Chech Republic, 1996. P. 268-283.
107. Thomas Prusek, Fadila Oukacine &Chantal Harvouet. A Methodology to Simulate the Impact of Tube Fouling on Steam Generator Performance With a Thermal-Hydraulic Code // Heat Transfer Engineering. Volume 38, 2017 – Iss. 7 – 8,-P.721-729.
108. Oleinik S. G. Effect of the Quantity, Composition, and Thickness of Deposits on the Damage to the Pipes of Steam Generators in Nuclear Power Plants with VVER Reactors //Atomic Energy. 2004, Volume 96, Issue 4, – P. 228–233.
109. Лукьянов А.А., Смыков В.Б. , Юрьев Ю.С. Локальные задачи роста слоя отложений на трубах горизонтального парогенератора // ФГУП Физико-

энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск. 2006, – С. 1 – 7.

110. Yur'ev Yu.S., Luk'yanov A.A., Smykov V.B. The effect of deposits on the tubes of a horizontal steam generator on its thermal – hydraulic characteristics // Thermal Engineering. 2007. Т. 54. № 12. С. 994-999.

111. Бакиров М.Б., Клещук М.С., Чубаров С.В., Немытов Д.С., Трунов Н.Б., Ловчев В.Н., Гуцев Д.Ф. Разработка атласа дефектов теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР. 7-ой международный семинар по горизонтальным парогенераторам, ФГПУ ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 3-5 октября 2006. Сборник трудов семинара. г. Подольск, РФ.

112. Сахно Н.В. Визначення критичних розмірів несуцільностей в теплообмінних трубах парогенераторів АЕС з ВВЕР для обґрунтування критерію глушіння труб / Н.В.Сахно, О.Г.Куценко, О.М.Харитонов, І.М.Каденко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки. – 2009. – Вип. №2.– С. 85 – 90.

113. Заславський В.А. Програмне забезпечення для управління безпечною експлуатацією парогенераторів АЕС / В.А.Заславський, Р.В.Єрмоленко, Н.В.Сахно, І.М.Каденко // Збірник наукових праць „Комп’ютерні засоби, мережі та системи”.– 2009.- №8.– С.18 – 27.

114. Lucia Bonavigo and Mario De Salve. Politecnico di Torino Italy. 17 Issues for Nuclear Power Plants Steam Generators. // In book: Steam Generator Systems: Operational Reliability and Efficiency. March 2011. – Р. 372 – 392.

115. Давиденко С.Е., Трунов Н.Б., Григорьев В.А., Брыков С.И., Попадчук В.С. Работоспособность теплообменных труб и управление ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР // 7-ой международный семинар по горизонтальным парогенераторам, ФГПУ ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 3-5 октября 2006. г. Подольск 15 с.

116. Кравченко В.П. Повышение безопасности и экономичности АЭС путем управления ресурсом трубопроводов второго контура // Ядерна та радіаційна безпека. – 2017. —№3.—С.—25–29.

117. Ефимов А. В., Каверцев В. Л., Потанина Т. В., и др. Математическая модель горизонтального парогенератора типа ПГВ–1000 энергоблока АЭС с ВВЭР // Вісник НТУ "ХПІ". 2014. № 13(1056). – С. 92 – 102.
118. Bouskela D, Chip V, El Hefni B., ets. New method to assess tube support plate clogging phenomena in steam generators of nuclear power plants // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. V 16, # 3. 2010. – Р. 257 – 267.
119. 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.
120. 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.
121. 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.
122. 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.
123. Шугайло А.П., Крицкий В.Б., Луговой П.З. Моделирование местных источников на внутренней поверхности трубопроводов для определения напряженного состояния конструкции в зоне дефекта // Вісник національного

авіаційного університету Том 1, № 27. 2006. – С. 80 – 82.

124. Крицкий В.Б., Луговой П.З., Шугайло А.П. , Биндус М.Г., Крицкая Н.И. Методология и программное обеспечение для определения предельно допустимого утонения стенок трубопроводов, подверженных эрозионно – коррозионному износу // Международная конференция Українського ядерного общества «УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ АЭС» 11 – 13 ноября , 2002, К.: – С.20.

125. Steam Generator Tube Integrity Program/Steam Generator Group Project: Final Project Summary Report (NUREG/CR-5117) Prepared by: R.J. Kurtz, R.A. Clark, E.R. Bradley, et al. Pacific Northwest Laboratory Richland, WA 99352. Date Published: May 1990.

126. Заразовський М. М., Бородій М. В., Козлов В.Я. Ризик–орієнтовний підхід до прогнозування цілісності та оптимізації контролю теплообмінного обладнання з великою статистикою дефектів // Ядерна та радіаційна безпека. — 2016. —№4.—С.—32–38.

127. Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWR NPPS “VERLIFE”. – version 2008. – report number: covers–wp4–d4.10.

128. Богдан А.В., Лохман И.В., Агеев С.М., Орыняк И.В. Расчет предельных нагрузок в трубопроводах с осевыми дефектами сложной формы // Проблемы прочности. – 2009. – №1. – С. 61 – 68.

129. Sanyal G., Samal M. K. Assessment of Axial Cracking of a Steam Generator // Journal of Metallurgical Engineering .Vol. 1, Iss. 2, July 2012 – P. – 53 – 62.

130. Товажнянський Л.Л. Методи і підходи до створення імітаційної моделі енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 для рішення завдань аналізу, діагностики і оптимального управління / Л.Л. Товажнянський, О.В. Єфімов, Т.В. Потаніна, Т.А. Гаркуша // Енергетика та ресурсозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2007. – № 6. – С. 120–140.

131. Auvinen A., Jokiniemi J.K., Lahde A. ats. Steam generator tube rupture (SGTR) scenarios // Nuclear Engineering Design 235 2005). –P. 457 – 472.

132. Нікуліна О.М., Северин В.П., Трубчанова Н.В. Математичні моделі систем управління парогенератором енергоблоку АЕС // XXV Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта,” Харків 17-19 травня 2017р. ХІІІ - С. 31.

133. Orynyak I. V. Leak and break models of ductile fracture of pressurized pipe with axial defects // Proc. of 6th Int. Pipeline Conf. (IPC 2006, Sept. 25–29, 2006). – Calgary, Alberta (Canada), 2006. – 3. – Pt. A. –P. 41 – 56.

134. Orynyak I.V., Krasovskiy A. Ya., Borodiy V.M., Ageev S.M. Development of procedure for determination of wall thickness in NPP pipeline at erosion –corrosion wear of material // Technical Diagnostics and Non – Destructive Testing, №4, 2017. – P.14 – 24.

135. Хашемиан Х. М. Прогнозное техническое обслуживание АЭС с применением оперативного контроля //Ядерна та радіаційна безпека. — 2013. — №4.—С.—42-50.

136. ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ «Оценка целостности теплообменных трубок парогенераторов третьего энергоблока Ровенской АЭС во время управления аварией» ДНТЦ ЯРБ, Київ. 2016. 74 с.

137. Неклюдов И.М., Ажажа В.М., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С. Эксплуатационные повреждения теплообменных трубок и сварных соединений в парогенераторах энергоблоков АЭС с ВВЭР – 1000 // Пробл. прочности. 2008. № 2. – С. 105 – 111.

138. Орыняк И.В. Прочность материалов и конструкций: Серия монографий/Под общей редакцией В.Т.Трощенко – Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. Т.4. Расчеты на прочность трубопроводов с дефектами. – 2011. – 472 с.

139. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 424 с.; илл. ISBN 978-5-283-03314-3.

140. Ainsworth R.A. The assessment of defects in structures of strain hardening

material // Engng Fract. Mech/ - 1984. – Vol. 19. – P. 633-642.

141. Andrade E.Q. and Benjamin A.C. “Structural evaluation of Corrosion Defects in Pipelines: Comparison of FE Analyses and Assessment Methods”, 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE 2004, May 2004. – P.120-127.
142. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
143. Ивлев Д.Д. О теории трещин квазихрупкого разрушения // Журнал Прикл. механики и технич. физики. 1967. №6. С. 88-128.
144. Астафьев В.И., Радаев Ю.Н., Степанова Л.В. Нелинейная механика разрушения. Самара: Самарский университет, 2001. 632 с.
145. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 стр.
146. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. Изд. 2-е, испр. М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
147. Марголин Б.З., Минкин А.И., и др. Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали // Вопросы материаловедения. – 2008. – Том 53, №1. – с. 123-138.
148. Марголин Б.З., Курсевич И.П., и др. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР, Сообщение 1, Связь радиационного распухания с радиационным охрупчиванием – экспериментальные результаты // Проблемы прочности. – 2009 – №6. – с. 5-16.
149. IAEA-TECDOC-1557. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Vessel Internals, 2007 Update. – Vienna: IAEA, 2007. – 65р.
150. Марголин Б.З., Минкин А.И., и др. Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали // Вопросы материаловедения. – 2008. – Том 53, №1. – с. 123-138.
151. Марголин Б.З., Курсевич И.П., и др. Охрупчивание и трещиностойкость высокооблученных аустенитных сталей для элементов ВКУ ВВЭР, Сообщение 1,

Связь радиационного распухания с радиационным охрупчиванием – экспериментальные результаты // Проблемы прочности. – 2009 – №6. – с. 5-16.

152. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости.

153. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с.

154. Кирияченко В.А., Черкашин А.С., Черкашина Н.И., Радчук И.В. Анализ статистики выхода из строя теплообменных труб парогенератора. УДК 621.311.25.002.5-192. Збірник наукових праць СНУЯЕтаП.

155. МТ-Т.0.03.224.11. Методика определения допустимых толщин элементов трубопроводов АЭС из углеродистых сталей подверженных действию эрозионно-коррозионного износа.

156. Трощенко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения/. – К.:Логос, 2000. – 571 с.

157. «Технический отчет «Оценка целостности теплообменных трубок парогенераторов третьего энергоблока Ровенской АЭС во время управления аварией» (выполнен по контракту №6F-30301 между ООО «UCHICAGO ARGONE» и ГП «ГНТЦ ЯРБ»), Киев, 2016».

158. Загальні положення безпеки атомних станцій, затверджені наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 19 листопада 2007 року № 162, зареєстровані у Міністерстві юстиції України 25 січня 2008 року за № 56/14747 (зі змінами)

159. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. – К.: Наукова думка, 1994 г.

160. Инструкция по дефектоскопии гибов трубопроводов из перлитной стали. – И., №23 СД-80, «Союзатомэнерго», 1980.

161. ПМ-Т.0.03.061-13 Типовая программа периодического контроля состояния основного металла, сварных соединений и наплавок оборудования и

трубопроводов атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000 (ТППК13).

162. Методические указания по проверке состояния технической безопасности атомных станций РД-7-7.

163. Предписание ГАЭН № 1-3 ЮУ АЭС А8-86-12 от 03.07.1986.

164. Противоаварийный циркуляр № Т-2/77, Москва, 1977.

165. Противоаварийный циркуляр № Ц-01-86, Москва, 1986.

166. Эксплуатационный циркуляр № Ц-01-86 (1), Москва, 1986.

167. Отчет о НИР «Разработка нормативно-технического документа по определению допустимых толщин элементов трубопроводов подверженных эрозионно-коррозионному износу на паропроводах и трубопроводах питательной воды». – Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, К.,1997.

168. Деклараційний патент на винахід «Зразок для дослідження напруженодеформованого стану трубопроводів з локальним стоншенням». Гарф Е.Ф., Крицький В.Б., Шидловський М.С., Шугайло О-р.П., Шугайло О-й.П./Міністерство освіти і науки України. Державний департамент інтелектуальної власності. Україна 69955 А, 7 G01N3/12.

169. Комплекс программ "ДИПРОС" (Динамика и прочность оболочечных систем). Описание применения (сокращенный вариант). - Киев, 1990. - 70 с. Деп. в УкрНИИНТИ 26.07.90, № 1222-Ук90.

170. Расчетный комплекс «ANSYS 16», разрешенный к использованию в ГП НАЭК «Энергоатом» (введено в дію розпорядженням ДП «НАЕК «Енергоатом» від 05.02.2018 № 137-р).

171. Расчетный комплекс «ASTRA-AES», разрешенный к использованию в ГП НАЭК «Энергоатом» (введено в дію розпорядженням ДП «НАЕК «Енергоатом» від 05.02.2018 № 137-р)

172. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов. – К: Высшая школа, 1993.

173. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. Пособие для студентов вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. Школа, 1982.-264 с.

174. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие. – Киев: Наукова думка, 1981. – 496 с.
175. «ОТЧЕТ о состоянии парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000 энергоблоков АЭС Украины за 2014 год». Отчет ГП НАЭК «Энергоатом». Киев, 2015, 166 стр.
176. Карзов Г.П., Суворов С.А., Федорова В.А., Филиппов А.В. Оценка динамики зарождения и развития повреждений теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 в рабочих режимах. //Материалы 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам, ФГУП ОКБ «Гидропресс», 3-5 октября 2006 г. Сборник трудов семинара. г. Подольск, РФ.
177. Карзов Г.П., Суворов С.А., Федорова В.А., Филиппов А.В. Основные механизмы повреждения теплообменных труб на различных этапах эксплуатации парогенераторов типа ПГВ-1000. Оценка динамики зарождения и развития повреждений теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 //Материалы 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам, ФГУП ОКБ «Гидропресс», 3-5 октября 2006 г. Сборник трудов семинара. г. Подольск, РФ.
178. Неклюдов И.М., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С., Гоженко С.В., Пыжный В.М., Феофентов Н.А., Бажуков А.В., Мельник П.Е. Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов Южно-Украинской АЭС. 7-ой международный семинар по горизонтальным парогенераторам, ФГПУ ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 3-5 октября 2006. Сборник трудов семинара. г. Подольск, РФ.
179. Парогенератор ПГВ-1000М. Расчет на прочность. Выбор геометрических размеров 320.05.01.00.000 РР06.
180. ТУ 108.1065-81. Парогенератор ПГВ-1000М с опорами. Технические условия.
181. Корпус парогенератора чертеж общего вида 320-05-01-02-000-ВО.
182. Коллектор пара. Сборочный чертеж 320.05.03.00.000 СБ.

183. Парогенератор ПГВ-1000М. Сборочный чертеж. 320.05.01.00.000СБ.
184. Парогенератор ПГВ-1000М с опорами. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1. 320.05.00.00.000 ТО. ОКБ «Гидропресс». Москва, 2000 г., 255 стр.
185. Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Пискун В.В., Прохоренко И.В., Савченко В.Г. Решение осесимметричной задачи термопластичности для тонкостенных и толстостенных тел вращения на ЭВМ. / К.: Наукова Думка . 1980. 196с.
186. Методы расчета оболочек. Т. 3. Теория упруго-пластических оболочек при неизотермических процессах нагружения/ Шевченко Ю.Н., Прохоренко И.В.- Киев: Наук. думка, 1981. – 296 с.
187. Чирков А.Ю. Анализ краевых задач, описывающих неизотермические процессы упругопластического деформирования с учетом истории нагружения // Пробл. прочности. – 2006. – № 1. – С. 69 – 99.
188. Харченко В.В., Чирков А.Ю., Кобельский С.В., Кравченко В.И. Методы расчетного анализа в задачах прочности элементов оборудования реакторных установок ВВЭР. – Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. 2018. – 293 с.



МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ
ЕНЕРГОАТОМ

НАЦІОНАЛЬНА АТОМНА
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА КОМПАНІЯ
Відокремлений підрозділ
Рівненська АЕС

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи

Шугайла Олексія Петровича

«Напружене-деформований стан трубчатих елементів парогенераторів при аварійних ситуаціях»,
виконаної в ДП «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» та Інституті механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (керівник роботи – доктор технічних наук, професор Луговий П.З.)

В матеріалах дисертаційної роботи представлено результати розрахункового аналізу напружене-деформованого стану теплообмінних трубок (TOT) та оцінки їх цілісності в умовах нормальної експлуатації парогенератору та в умовах проектної аварії (втрата основної і аварійної живильної води, повне знецтрумлення енергоблоку) з урахуванням поточного технічного стану TOT для можливості виконання робіт з продовження проектного строку експлуатації.

Результати дисертаційної роботи О.П. Шугайла знайшли своє відображення у Науково-технічному звіті «Технический отчет «Оценка целостности теплообменных трубок парогенераторов третьего энергоблока Ровенской АЭС во время управления аварией», что виконаний за договором №6F-30301 між ТОВ «UCHICAGO ARGONE» та ДП «ДНТЦ ЯРБ», використані ВП «Рівненська АЕС» при обґрунтуванні можливості експлуатації парогенератору енергоблоку № 3 у понадпроектний період та використовуються для вироблення стратегії управління аваріями, що пов’язані із підживленням парогенератора в умовах його осушення при виникненні важких аварій.

Головний інженер – перший
заступник генерального директора ВП РАЕС  П.І. Ковтонюк

