

УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ

Кіпоренко Ганна Сергіївна

УДК 658.562

**УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ
АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі охорони праці, стандартизації та сертифікації Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник:

доктор технічних наук

Триш Роман Михайлович, Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, завідувач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Ігуменцев Євгеній Олександрович, Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, професор кафедри системи управління технологічними процесами та об'єктами.

кандидат технічних наук

Рудик Юрій Іванович, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності МНС України, доцент кафедри електротехніки, пожежної і промислової автоматики та зв'язку.

Захист відбудеться «21» травня 2010 р. о ___ на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.108.04 в Українській інженерно-педагогічній академії за адресою: 61003, м. Харків, вул. Університетська, 16.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української інженерно-педагогічній академії за адресою: 61003, м. Харків, вул. Університетська, 16.

Автореферат розісланий «20» квітня 2010 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



І.В. Коваленко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Атомна енергетика є однією із наймолодших та найдинамічніших галузей світової економіки. В Україні працює 15 енергоблоків зі встановленою потужністю 11835 МВт, що складає 47,5% від загального виробництва електроенергії. Специфікою одержання електроенергії на атомних електростанціях (АЕС) є використання ядерного палива, що робить їх особливо небезпечними. Тому до проектування, експлуатації та проведення робіт на атомних станціях передбачаються підвищені вимоги безпеки.

При проектуванні енергоблоків атомних станцій в Україні було закладено ресурс 30 років, при цьому значна частина енергообладнання наблизилась до встановлених термінів безпечного використання, або вже їх вичерпала. У зв'язку з цим для безпечної роботи енергообладнання постають питання про зняття його з експлуатації, або ж подовження термінів роботи, для чого необхідним є наукове обґрунтування.

Згідно з вимогами МАГАТЕ усі роботи, пов'язані з енергообладнанням АЕС, повинні виконуватися відповідно до існуючих нормативних документів з безпеки. Але існуюче нормативне забезпечення з безпечної експлуатації енергообладнання не регламентує у повному обсязі проведення комплексного аналізу стану трубопроводів для визначення їх залишкового ресурсу, так як не враховує технічні характеристики та параметри, що змінилися у процесі їх експлуатації під впливом експлуатаційних факторів, серед яких ерозійно-корозійний знос та вібрації. У зв'язку з цим для безпечної експлуатації АЕС необхідно вдосконалити нормативно-методичне забезпечення з експлуатаційної безпеки трубопроводів атомних станцій в частині розрахунку залишкового ресурсу енергообладнання атомних станцій на основі моніторингу технічних параметрів металу трубопроводів, що дозволить оптимізувати процес експлуатації та здійснити перехід до роботи у надпроектні терміни без значних зупинок та матеріальних втрат.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася за науковим напрямком кафедри «Охорона праці, стандартизація та сертифікація» Української інженерно-педагогічної академії у рамках НДР, проведених у 2004-2009 рр.: ДР №0106U008854 «Проведення комплексного дослідження та розрахунок елементів трубопровідних систем з корозійно-ерозійним зносом, прогнозування аварійних ситуацій»; ДР №0109U004829 «Розробка нормативного документу розрахунку віброміцності та залишкового ресурсу трубопроводів АЕС України»

Участь здобувача у виконанні вище названих тем – відповідальний

виконавець.

Мета роботи полягає у побудові нормативно-методичного забезпечення з експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних станцій на основі розробки науково-обґрунтованої математичної моделі та алгоритму прогнозування їх залишкового ресурсу при різних типах навантаження.

Для досягнення постановленої мети було сформульовано такі задачі:

1. Проаналізувати існуючу нормативну базу з безпеки трубопровідних систем атомних станцій та запропонувати її класифікацію з урахуванням характеристик їх технічного стану.

2. Розробити математичну модель прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів АЕС з урахуванням експлуатаційних факторів.

3. Побудувати розрахункову кінцево-елементну модель головного циркуляційного трубопроводу(ГЦТ) атомної станції та на її основі розробити покроковий алгоритм розрахунку його залишкового ресурсу.

4. Виконати експерименти та дослідницько-виробничі випробування з перевірки отриманих теоретичних результатів і отримані дані використати для створення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем АЕС.

5. Запропонувати уніфікацію додаткових опор відповідно до типу навантаження трубопроводів АЕС згідно з їх кодифікатором, що дозволить зробити раціональний вибір числа їх різновидів.

6. На основі запропонованих моделей, алгоритмів та методів розрахунку і одержаних даних розробити проект нормативного документу з експлуатаційної безпеки трубопровідних систем АЕС галузевого рівня.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій.

Предметом дослідження є нормативно-методичні документи з експлуатації трубопроводів АЕС.

Методи дослідження - теоретичні та експериментальні. Теоретичні базуються на сучасних положеннях теорії стандартизації, фундаментальних положеннях в галузі динаміки та міцності, теорії систем.

Експериментальні дослідження базуються на використанні сучасних вимірювальних приладів, статистичної обробки даних та апробованих інженерних методиках.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі аналізу та узагальнення даних, методів і засобів оцінки стану трубопроводів АЕС розроблено алгоритм прогнозування їх експлуатаційної безпеки при

різних типах навантаження і відповідне нормативно-методичне забезпечення. Новизна базується на таких наукових розробках:

1. Класифікації трубопроводів АЕС шляхом систематизації їх за класами безпеки, середовищем теплоносія та різними типами навантаження, що дозволило удосконалити кодифікатор трубопровідних систем.

2. Математичній моделі розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів АЕС, яка, на відміну від існуючої, враховує зміни товщини їх стінки при дії експлуатаційних факторів та дозволить точніше прогнозувати час їх експлуатації.

3. Удосконалено метод розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів АЕС на основі побудованої розрахункової кінцево-елементної моделі, яка дозволяє змодельовати ступінь дефектності від ерозійно-корозійного зносу та визначити вібраційне навантаження. На основі отриманих даних розроблено покроковий алгоритм оцінки та прогнозування залишкового ресурсу.

4. Системи нормативних параметрів, яка включає моделі визначення розрахункового ресурсу, криві залежності напруги металу трубопроводу в процесі експлуатації та уніфікацію опор відносно типу трубопроводу згідно з їх класифікацією, що включені до розробленого стандарту НАЕК «Енергоатом» України.

Сукупність наукових розробок є основою для проведення робіт по подовженню терміну служби трубопроводів атомних станцій понад запроєктований. Дані розробки можуть бути застосовані і для інших трубопроводів при розрахунку ресурсу з урахуванням впливу експлуатаційних факторів.

Наукові результати отримані автором особисто і є теоретичною основою для вирішення науково-прикладних завдань.

Практична цінність отриманих результатів. Розроблено галузевий нормативний документ НАЕК «Енергоатом» України – МВ-Т.0.27.003-09 «Методика вібродослідження трубопровідних систем АЕС», підготовлений відповідно до плану стандартизації НАЕК «Енергоатом» на 2009р.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено:

- НАЕК Енергоатом ВП «Південноукраїнська АЕС» (акт впровадження від 26.12.2006р);
- Навчальний процес Української інженерно-педагогічної академії (акт впровадження від 16.02.2007р.)

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати отримані автором самостійно. Теоретичні та експериментальні дослідження, що

виносяться на захист, проведені автором особисто. У спільних наукових роботах автором виконано постановку завдань досліджень, систематизовано та оброблено результати. Участь автора у господарських роботах підтверджена актами впровадження.

Апробація результатів роботи. Результати роботи доповідались й обговорювались: на 3-й Міжнародній науково-практичній конференції «Динаміка наукових досліджень, 2004» (Дніпропетровськ, 2004 р.), на 2-у науково-практичному семінарі «Підвищення надійності зварних з'єднань при монтажі та ремонті технологічного обладнання в енергетиці» (Київ, 2005р.), на Всеукраїнській науково-методичній конференції «Методика навчання технічним дисциплінам» (Харків, 23-25 листопада 2004р.), на 27-й Науково-педагогічній конференції працівників, вчених, аспірантів та наукових співробітників Української інженерно-педагогічної академії (Харків, 2005р.), на 15-й Міжнародній конференції «Нові технології у машинобудуванні», (Харків-Рибаче, 2005р.), на 1-й Міжнародній науково-практичній конференції «Людина-технології-середовище: стандартизація, сертифікація та управління якістю. Теорія та практика» (Судак, 15-19 вересня 2009 р.), на наукових семінарах кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації Української інженерно-педагогічної академії.

Публікації. Результати досліджень опубліковано у 13 наукових роботах, 9 з них - у журналах, що входять до переліку ВАК України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг складає 140 сторінок друкованого тексту, із них: 64 рисунків (3 окремо на 3 сторінках), 26 таблиць (3 окремо на 3 сторінках), бібліографія з 116 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і задачі дисертаційної роботи, визначені наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі розглянуто сучасний стан нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій України.

Відповідно до вимог нормативних документів щодо безпечної експлуатації атомних станцій при проведенні оцінки та прогнозуванні залишкового ресурсу такі дослідження рекомендується проводити лише у разі виявлення значних вібрацій, але на практиці навіть незначні, умовно назвемо їх малоциклові навантаження, що виникають при

температурних розширеннях, небезпечні для трубопровідних систем. При цьому нормовані методи оцінки віброміцності, що повинні використовуватись згідно ПНАЕ Г-7-002-86 «Норм розрахунку на міцність обладнання і трубопроводів атомних енергетичних устаткувань» базуються на основі побудови стрижневої моделі трубопроводів, яка не дає змогу достовірно оцінити пружно-деформований стан трубопроводної системи.

У роботах вітчизняних і зарубіжних авторів таких, як А.А.Самарін, А.Ф.Гетман, Г.Н.Ноздрін, А.В. Корольов, W. Kastner та інших, наведено методи оцінки й зниження вібрацій та приведено аргументи щодо необхідності проведення дослідження вібраційного стану трубопроводів, тобто розрахунок на віброміцність при визначенні залишкового ресурсу або перепризначенні термінів експлуатації енергообладнання атомних станцій. Також в роботах наведено методи оцінки напружено-деформованого стану матеріалу трубопроводів на основі аналізу ерозійно-корозійного зносу, що значно впливає на безпечну роботу АЕС. Але завдання забезпечення експлуатаційної безпеки необхідно вирішувати комплексно, тобто з урахуванням усіх експлуатаційних факторів.

У зв'язку з тим, що вібрація є основним фактором у руйнуванні металу не тільки трубопроводів атомних станцій, а й інших промислових машин (промислових турбін, вентиляторів, повітродувок, електродвигунів усіх типів, компресорів та насосів), то значна увага приділяється розробці стандартів з контролю вібрації та норм вібрації для промислових машин. В Україні у 1993 році були розроблені перші редакції ДСТУ 3160:1995 - ДСТУ 3163:1995, що регламентують контроль вібрації різних промислових машин та відповідають вимогам міжнародних стандартів. На сьогодні ці стандарти є поки що єдиними для оцінки вібраційного стану при сертифікації лише компресорного обладнання, але вони не придатні для оцінки вібрації трубопровідних систем атомних станцій, через особливості їх конструкції.

Таким чином, вирішенням науково-технічного завдання є створення нормативних документів з безпечної експлуатації трубопровідних систем на основі розробки науково-обґрунтованої моделі та алгоритму розрахунку трубопроводів атомних станцій .

У **другому розділі** зроблено систематизацію трубопровідних систем (рис.1) для уніфікації розрахунку залишкового ресурсу трубопроводу при оцінці експлуатаційної безпеки АЕС. Це дозволило розробити класифікатор трубопроводів за такими трьома ознаками: класом безпеки, середовищем теплоносія, критерієм, що характеризує

технічний стан. Розроблений кодифікатор трубопроводів (рис.2) дозволяє визначити необхідний алгоритм розрахунку залишкового ресурсу.

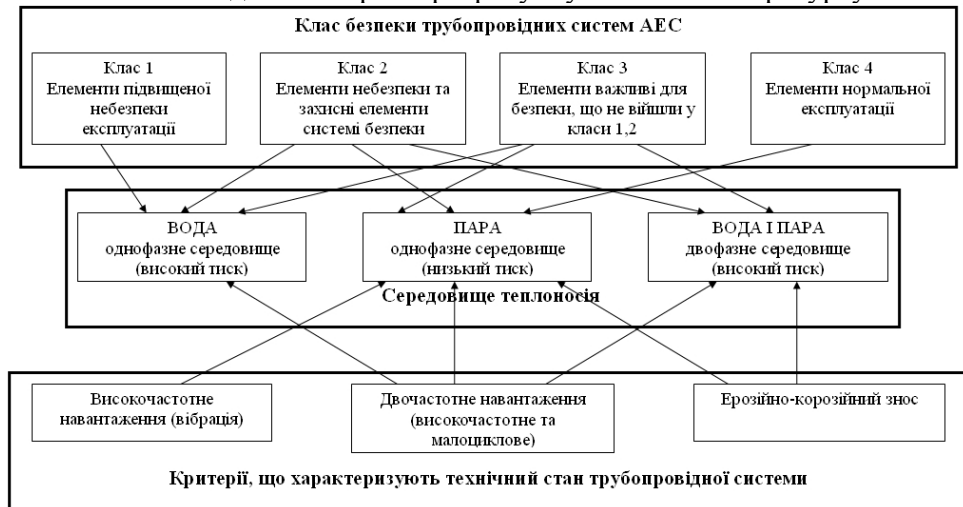


Рис. 1. Схема систематизація трубопровідних систем АЕС за впливом на стан безпеки.

Тобто, крім відображення у кодифікаторі таких даних, як: атомна станція, номер енергоблоку, відділення, код трубопроводу та його порядковий номер додаються знаки, що визначають:

- клас безпеки: К1 (Клас1), К2 (Клас2), К3 (Клас 3), К4 (Клас 4);
- середовище теплоносія: В (вода), П (пара), Д (двофазне середовище, вода і пара);
- критерії, що характеризують технічний стан: 01 - високочастотне навантаження (вібрація); 02 - двочастотне навантаження (високочастотні та малоциклові навантаження); 03 – ерозійно-корозійний знос; 13 - високочастотне навантаження та ерозійно-корозійний знос; 23 – двочастотне навантаження та ерозійно-корозійний знос.

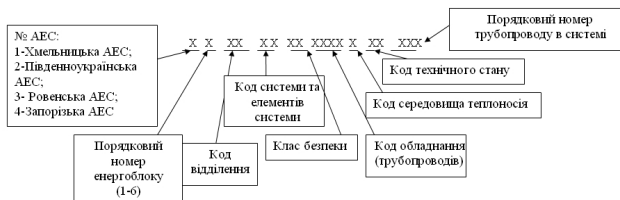


Рис.2. Кодифікатор трубопровідних систем АЕС.

Вдосконалений кодифікатор дає можливість уніфікувати об'єкти стандартизації та розробити уніфікований алгоритм розрахунку

залишкового ресурсу трубопровідних систем. Для побудови алгоритму необхідно розробити математичну модель визначення залишкового ресурсу трубопроводу, яка враховує ознаки, що відображені у вдосконаленому кодифікаторі.

Для розробки математичної моделі визначення залишкового ресурсу трубопроводу використовували фрагмент головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ), так як він є одним з найважливіших трубопроводів у системі забезпечення безпечної експлуатації на атомних станціях, працює в умовах значних вібраційних та малоциклових навантажень та

ерозійно-корозійного зносу (2 клас безпеки).

На *першому етапі* розробки математичної моделі була побудована розрахункова кінцево-елементна модель трубопроводу (рис. 3) та визначені його амплітудно-частотні характеристики.

Другим етапом була побудова блоку навантаження трубопроводу після його планово-попереджувального ремонту та визначено його напружено-деформований стан при малоциклових навантаженнях методом кінцевих елементів.

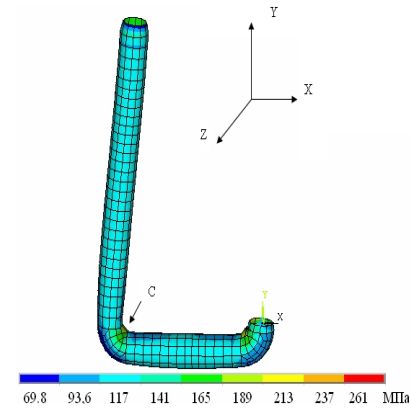


Рис. 3. Розподіл інтенсивності напруження в трубопроводі ГЦТ.

Третій етап полягав у визначенні напружено-деформованого стану трубопроводу, що виникає при вібраційних навантаженнях. Для цього були задані значення пульсації тиску при транспортуванні теплоносія та визначені напруження, що виникають у матеріалі трубопроводу.

Четвертим етапом було моделювання дефекту методом кінцевих елементів, який виникає при ерозійно-корозійному зносі та визначено напружено-деформований стан в зоні максимального потоншення стінки трубопроводу.

Отримані дані напружено-деформованого стану свідчать про лінійність процесів, які відбуваються при малоциклових навантаженнях, вібрації та ерозійно-корозійному зносі. Таким чином, математичну модель накопичення втомленісних пошкоджень для визначення залишкового ресурсу можна запропонувати у вигляді

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\sigma_a(t)}{T\sigma_{-1K}^m N_0}, \quad (1)$$

де σ_{-1k} , N_o , m – параметри кривої втоми; T – ефективний період навантаження; $\sigma_a(t)$ – еквівалентна амплітуда напруги в небезпечній зоні, схильній до ерозійно-корозійного зносу.

На основі математичної моделі розроблено моделі визначення розрахункового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження, згідно з кодифікатором (табл.1), що дозволить підвищити достовірність прогнозу.

Таблиця 1

Моделі визначення розрахункового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження

Тип трубопроводу	Моделі визначення розрахункового ресурсу трубопроводу при різних типах навантаження	Примітки
К2 В01 К2 П01 К2 Д01 К3 В01 К3 П01 К3 Д01 К4 П01	EMBED Equation.3 $N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)A}{\ln(1/(1 - \varphi))} \right]^m$	ε_a – малоциклова втомленість; σ_{-1} – межа втомленості; E – модуль пружності; φ – коефіцієнт поперечного перерізу
К1 В02 К2		ε_{ai} – малоциклова втомленість при блочному навантаженні

<p>B02 K2 Д02 K3 B02 K3 Д02 K4 П02</p>	$N = \left[\frac{(\varepsilon_{a_i} - \sigma_{-1}/E)4}{\ln\left(\frac{1}{1-\varphi}\right)} \right]^m$	
<p>K2 B03 K2 Д03 K3 B03 K3 Д03</p>	$N = \frac{2}{(n-2)CY^n \pi^{n/2} \Delta\sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_o^2} - \frac{1}{a_c^2} \right]^{\frac{1}{n-2}}$	<p>n- число циклів до руйнування; C – константа, що характеризує циклічне руйнування сталі</p>
<p>K2 B13 K2 Д13 K3 B13 K3 Д13</p>	$N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)4}{\ln(1/(1-\varphi))} \right]^m$	<p>m – коефіцієнт, що характеризує механічні параметри сталі</p>
<p>K2 B23 K2 Д23 K3</p>	$N = \frac{2}{(n-2)CY^n \pi^{n/2} \Delta\sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_0^{(n-2)/2}} - \frac{1}{a_c^{(n-2)/2}} \right]$	<p>a_o, a_c – параметри дефекту при циклічному навантаженні; Y – коефіцієнт інтенсивності напруги</p>

Для визначення залишкового ресурсу побудовано уніфікований покроковий алгоритм на основі запропонованої математичної моделі, який полягає у такому:

Крок 1. Визначення накопичення втомленісних пошкоджень трубопроводу, згідно з формулою (1), де $\sigma_a(t) = K(P/h(t))$.

P – тиск у трубопроводі; $h(t)$ – товщина стінки у трубопроводі в небезпечній зоні, у місці ерозійно-корозійного зносу, в залежності від часу, K - коефіцієнт пропорційності розподілу тиску в трубопроводі.

Крок 2. Визначення умовної щільності ймовірності ступеня пошкоджень.

$$z(t) = P^m F(t, t_0), \quad (2)$$

$$\text{де } F(t, t_0) = \frac{1}{T \sigma_{-1k}^m N_0} \left[t_0 h_0^{-m} - \frac{1}{v(1-m)} \left((h_0 - v(t-t_0))^{1-m} - h_0^{1-m} \right) \right],$$

де v – швидкість зносу; T – робоча температура; t_0 – момент зародження дефекту; t - момент часу вимірювання; h_0 – початкова товщина стінки.

Крок 3. Визначення накопичення втомленісних пошкоджень z_i для i -го проміжку часу експлуатації та межі витривалості

$$z_i = N_i \frac{\sigma_{ai}^m}{\sigma_{-1ki}^m N_0} \quad (i = \overline{1, k}), \quad (3)$$

де σ_{-1ki} – межа витривалості конструкції для i -го проміжку часу; σ_{ai} – максимальна напруга в елементі трубопроводу; N_i - число циклів навантаження.

$$\sigma_{-1ki} = \sigma_{-1i} / K_{\sigma D}, \quad (4)$$

де σ_{-1i} – межа витривалості металу трубопроводу в зоні дефекту. Коефіцієнт розподілу напруги в трубопроводі $K_{\sigma D}$ визначається:

$$K_{\sigma D} = 2 \alpha_{\sigma} / \left[1 + \left(\frac{1}{88,3} \frac{L}{G} \right)^{-v\sigma} \right] + \frac{1}{\beta} - 1, \quad (5)$$

де L – периметр перерізу, в якому спостерігається концентрація напруги; α_{σ} – коефіцієнт концентрації; β – коефіцієнт, залежний від матеріалу трубопроводу; G – градієнт максимальної напруги.

Крок 4. Ступінь i пошкодження трубопроводу на i -му проміжку часу. Знаючи межу витривалості елемента трубопроводу, можна знайти

пошкодження.

Пошкодження на i -му проміжку часу знаходиться:

$$a_i = N_i / [N_0] \quad (6)$$

Число циклів навантаження до руйнування визначається:

$$[N_0] = N_0 \sigma_{-1ki}^m / \sigma_{ai}^m \quad (7)$$

Крок 5. Визначення залишкового ресурсу

$$r_{ост} = z / a_c, \quad (8)$$

де z - запас по ушкодженню $z = 1 - a_k$,

a_k - накопичення втомленісних напружень за рік, середньорічне пошкодження $a_c = (1/N + 1/[N_0]) / 2$,

де N - розрахунковий ресурс трубопроводу (табл. 1).

На основі проведених численних досліджень встановлено, що максимальна напруга виникає в області згину трубопроводу, проте, як показали розрахунки, небезпечнішою з погляду накопичення втомленісних пошкоджень виявилася зона дефекту.

У **третьому розділі** представлено експериментальні дослідження, які проведені на Південноукраїнській та Рівненській атомних електростанціях на головному циркуляційному трубопроводі. Завданням експериментальних досліджень було з'ясування правомірності запропонованої математичної моделі прогнозування ресурсу та визначення правомірності теоретично отриманих результатів шляхом порівняння їх із незалежними дослідними даними.

Методика експериментальних досліджень передбачала визначення:

- 1) пульсацій тиску у трубопроводі на різних ділянках для виявлення найбільш навантаженої;
- 2) амплітудно-частотних характеристик трубопроводу для порівняння з отриманими розрахунковими даними;
- 3) амплітудно-частотних характеристик трубопроводу після встановлення додаткових опор;
- 4) накопичення втомленісних пошкоджень при різних циклах навантаження.

В експериментальних дослідженнях випробувались трубопроводи діаметром 560x34 мм, виготовлені зі сталі 20, середовище теплоносія – двофазне, тиск в трубопроводі 14 МПа. Вибір засобів та методів експериментальних досліджень обумовлен нормативними положеннями "Загальні положення безпеки атомних станцій" НП 306.2.141-2008.

Для вимірювання пульсацій тиску було використано диференційний манометр з граничним значенням перепаду тиску вимірювання $3 \cdot 10^5$ Па

та приведеною похибкою 3%. Контрольними точками для вимірювання були зони з'єднань різних конструктивних елементів трубопроводів, зони їх згинів, місця кріплення елементів конструкцій.

Експериментальні дослідження підтвердили розрахункові в тому, що найбільш високі пульсації тиску виникають на криволінійній ділянці трубопроводу. Розмір пульсацій тиску в цій ділянці 14 кПа, що призводить до значних вібрацій трубопроводу.

На наступному етапі було проведено контроль вібрації досліджуваної ділянки трубопроводу шляхом визначення амплітудно-частотних характеристик. Для цього використовувалися п'єзоелектричні акселерометри з діапазоном вимірювання від 1 Гц до 10000 Гц та приведеною похибкою $\pm 2,2\%$ при нерівномірності амплітудно-частотної характеристики $\pm 3,8\%$.

Порівняльні результати експериментальних та розрахункових досліджень наведені на рис. 4, з якого видно, що отримані дані мають високий ступінь збігу, який склав 90 %, що підтверджує правомірність отриманих розрахункових даних визначення залишкового ресурсу з використанням запропонованої математичної моделі.

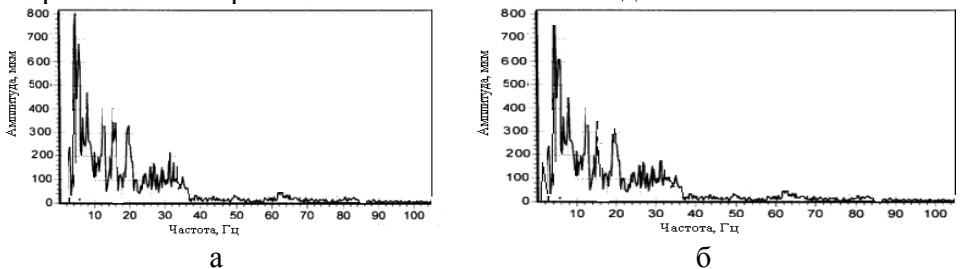


Рис. 4. Експериментальні (а) та розрахункові (б) амплітудно-частотні характеристики ГЦТ

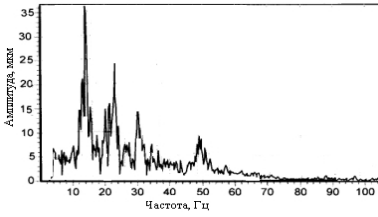


Рис. 5. Опора демпфіруюча гідравлічна: 1 – трубопровід; 2 - опора

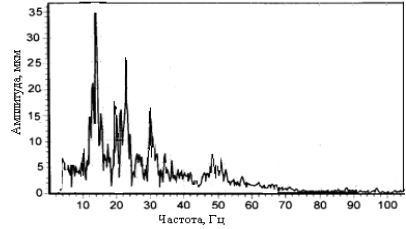
Для зменшення вібрації до безпечного рівня та продовження терміну експлуатації трубопроводу на ГЦТ, пропонується розміщення додаткових гідравлічних демпфіруючих опор (рис.5), що шляхом надання додаткової жорсткості трубопроводу дозволяють провести відстроювання від резонансу. Вибір типу опор, розрахунок їх характеристик та місця їх розташування проводились згідно з нормами проектування трубопроводів АЕС. Маса приведеної до опори ділянки

трубопроводу 140 кг, жорсткість трубопроводу, приведеного до елемента опори, $11,4 \cdot 10^6$ Н/м.

Експериментальні та розрахункові значення амплітудно-частотних характеристик після встановлення додаткових опор наведені на рис. 6, з якого видно, що вони мають високий ступінь збігу з розрахунковими (до 95 %). Такий ступінь збігу експериментальних та розрахункових даних доводить правомірність запропонованої математичної моделі визначення залишкового ресурсу.



а



б

Рис. 6. Експериментальні (а) та розрахункові (б) амплітудно-частотні характеристики трубопроводу ГЦТ з додатковими опорами.

Амплітуда вібрації після установки додаткових опор знизилась на порядок, при цьому частоти збудження та власні частоти трубопроводу значно відрізняються, що свідчить про відсутність резонансу.

На основі проведених розрахунково - експериментальних досліджень та отриманих даних з Південноукраїнської та Рівненської АЕС за весь період експлуатації різних трубопроводів наведено криві залежності напруги, яка виникає в металі трубопроводу при різних типах навантаження та від кількості циклів навантаження у процесі експлуатації (рис. 7-10).

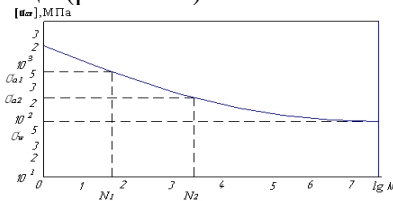


Рис. 7. Розрахункова крива

втомленості вуглецевих і легованих сталей з $\sigma_{0,2}^T / \sigma_m^T \leq 0,7$ до $T=623$ К. Схема визначення накопиченого втомленісного пошкодження при двох режимах навантаження

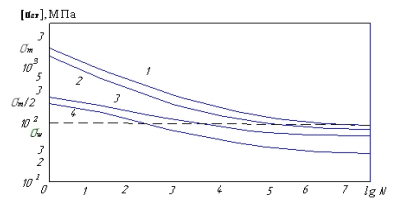


Рис. 8. Криві втомленості при

ерозійно-корозійному зносі у різних середовищах та циклах навантаження:

- 1,3 – повітряне середовище;
- 2,4 – корозійно-активне

трубопроводу;

σ_{a1} , σ_{a2} - відповідно блок навантаження з ресурсом $N1$, $N2$;

σ_w - межа витривалості.

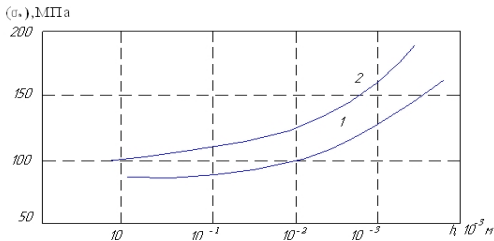


Рис. 9. Криві залежності

зростання інтенсивності напруги від товщини стінки в процесі експлуатації:

1 - для трубопроводів діаметром 560x34 мм;

2- для трубопроводів діаметром 89x8мм

середовище;

1,2 – малоциклові навантаження; 3,4 – високочастотні навантаження ;

σ_m - мембранна напруга.

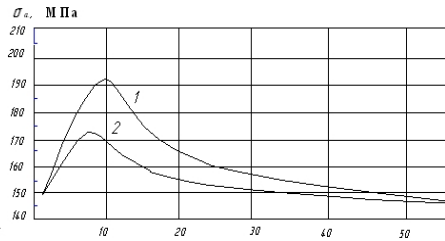


Рис. 10. Криві АЧХ

резонансної напруги при високочастотному навантаженні та ерозійно-коро-зійному зносі:

1- для трубопроводів із сталі 08X18H10T;

2 - для трубопроводів із сталі 20.

Одержані залежності дозволяють розробити систему нормативних параметрів, які увійшли у розроблений стандарт.

У **четвертому розділі**, на підставі досліджень та запропонованої математичної моделі визначення залишкового ресурсу трубопроводів при різних параметрах навантаження, розроблено галузевий нормативний документ НАЕК «Енергоатом» України – МВ-Т.0.27.003-09 «Методика вібродослідження трубопровідних систем АЕС», підготовлений відповідно до плану стандартизації НАЕК «Енергоатом» на 2009р. Він поширюється на роботи, пов'язані з оцінкою вібраційного стану трубопроводів атомних електростанцій з реакторними установками ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 та встановлює процедуру, методи, засоби та способи вібраційного дослідження трубопроводів, проведення розрахункової оцінки віброміцності в умовах довгострокової експлуатації та розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів.

Стандарт регламентує порядок і методику проведення прогнозування ресурсу під впливом різних експлуатаційних факторів. Він регламентує

порядок отримання інформації для оцінки вібраційного стану трубопроводу, що досліджується, визначення залишкового ресурсу трубопроводу для прийняття рішення щодо можливості його подальшої безпечної експлуатації, визначення терміну продовження експлуатації шляхом установки додаткових опор на трубопровід, тощо.

Об'єктами оцінки та прогнозування ресурсу можуть бути будь-які трубопроводи атомних станцій на різних етапах експлуатаційного циклу, різного діаметру та металу. Згідно з розробленим кодифікатором проведено уніфікацію опор (табл.2), що дозволить їх вибирати в залежності від типу навантаження.

Таблиця 2

Уніфікація опор відносно до типу трубопроводу АЕС

Тип трубопроводу	Тип опори
K2B01, K2П01, K2Д01, K3B01, K3П01, K3Д01, K4П01	Пружинні опори та підвіски, жорсткі опори, направляючі опори.
K1B02, K2B02, K2Д02, K3B02, K3Д02, K4П02	Пружинні опори та підвіски, жорсткі опори, направляючі опори, ковзні опори, антивібраційні опори
K2B03, K2Д03, K3B03, K3Д03	Пружинні опори та підвіски, направляючі, ковзні, антивібраційні та демпфіруючі опори.
K2B13, K2Д13, K3B13, K3Д13	Пружинні опори та підвіски, направляючі опори, ковзні опори, антивібраційні опори, демпфіруючі опори
K2B23, K2Д23, K3Д23	Пружинні опори та підвіски, направляючі опори, антивібраційні та демпфіруючі опори.

При проведенні оцінки вібраційного стану та залишкового ресурсу рекомендується створити базу даних, що влючає наступну інформацію: експлуатаційні дані по трубопроводам, данні вимірів вібраційних характеристик, результати розрахункового аналізу характеристик, данні о прийнятих технічних заходах по зниженню рівня вібрації (рис.11).

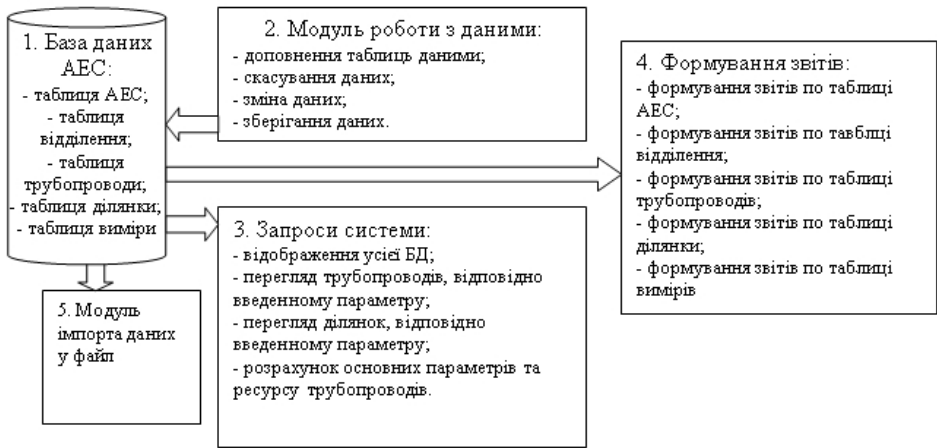


Рис. 11. Структурна схема бази даних при проведенні оцінки вібраційного стану та залишкового ресурсу трубопроводів АЕС.

Оцінка вібраційного стану та залишкового ресурсу трубопроводів проводиться після закінчення закладеного при проектуванні терміну експлуатації для вирішення питання щодо можливості його продовження, у процесі експлуатації для гарантування безпеки, у період планово попереджувальних ремонтів (кожні 9 місяців експлуатації), у період примусових зупинок роботи енергоблоку в разі виникнення аварійних ситуацій, на вимогу органу із сертифікації та інше.

ВИСНОВКИ

У дисертації здійснено теоретичне обґрунтування та запропоновано математичну модель визначення залишкового ресурсу, яка дозволить удосконалити нормативне забезпечення безпечної експлуатації трубопровідних систем АЕС. Запропоновано алгоритм розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів у процесі експлуатації при різних типах навантаження.

1. Проведено аналіз нормативних документів з експлуатаційної безпеки АЕС та запропоновано систематизацію та класифікацію трубопровідних систем за класами безпеки. Удосконалено кодифікатор трубопроводів, що дозволить вибрати алгоритм їх розрахунку для оцінки залишкового ресурсу.

2. Вперше запропоновано математичну модель прогнозування залишкового ресурсу в процесі експлуатації трубопровідних систем атомних електростанцій при багатоцикловій втомленості трубопроводів, які мають дефекти в результаті ерозійно-корозійного зносу. Математична

модель є основою для розробки нормативних параметрів оцінки напруженого стану трубопроводів. Напруга в зоні згину при вібраційному навантаженні склала $\sigma_{3\sigma} = 256$ МПа, максимальна напруга виявлена в зоні дефекту при вібраційному навантаженні та складає $\sigma_{3\sigma} = 316$ МПа, що свідчить про необхідність врахування всіх експлуатаційних факторів, що діють на трубопровід

3. Запропоновано покроковий алгоритм розрахунку залишкового ресурсу, який дозволив розробити моделі визначення розрахункового ресурсу в умовах багатоциклової втомленості трубопроводів, що мають дефекти в результаті ерозійно-корозійного зношування. Розрахунок залишкового ресурсу ГЦТ дає можливість продовжити термін його експлуатації на 7 років.

4. Проведено експериментальні дослідження вібрації трубопроводів АЕС та перевірено ступінь збігу з отриманими теоретичними результатами. Розбіжність розрахункової та експериментальної амплітудної характеристик складає не більше 10 %, що не перевищує нормативних параметрів та підтверджує правомірність запропонованої математичної моделі визначення залишкового ресурсу.

5. Здійснено уніфікацію додаткових опор відповідно до класифікатора трубопроводу на основі визначення амплітудно-частотних його характеристик, до та після розміщення додаткових опор. Експериментальні та розрахункові дослідження показали, що раціональне розміщення додаткових опор дозволяє знизити вібраційне навантаження на 70% та підвищити експлуатаційну безпеку АЕС.

6. Розроблено систему нормативних параметрів у вигляді моделей визначення розрахункового ресурсу, кривих залежності напруги металу трубопроводу в процесі експлуатації та уніфікації опор відносно до типу трубопроводу згідно з їх класифікацією, що увійшли в розроблений галузевий нормативний документ НАЕК «Енергоатом» України – МВ-Т.0.27.003-09 «Методика вібродослідження трубопровідних систем АЕС» (План стандартизації НАЕК «Енергоатом» України на 2009р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

1. Полищук С.М., Кипоренко А.С., Баранов А.Н., Мазорчук М.С. Проблемы и методы оценки продления ресурса трубопроводов АЭС // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2004. - №2(6). - С. 110-114.

2. Полищук С.М., Кипоренко А.С., Баранов А.Н. Снижение вибрационной активности сливного коллектора охлаждения статора генератора // Восточно-европейский журнал передовых технологий. –

2005. - №2/2(14). – С. 56-58.

3. Полищук С.М., Кипоренко А.С., Баранов А.Н. Оценка вибронпряжений трубопроводов атомных электростанций // Восточно-европейский журнал передовых технологий.–2006.-№2/2(20).–С.147-149.

4. Полищук С.М., Кипоренко А.С., Сидоренко П.А., Баранов А.Н. Влияние системы регулирования на динамику движения двухфазных сред в трубопроводах крупных энергоблоков // Вестник национального политехнического университета «ХПИ». – 2005.- № 57. –С.42-49.

5. Полищук С.М., Кипоренко А.С., Баранов А.Н., Сидоренко П.А. Экспертная оценка гидравлических гасителей колебаний для трубопроводов мощных энергоблоков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2006.- № 1/2(19). – С. 176-178.

6. Кипоренко А.С., Полищук С.М., Ляпунов А.М., Баранов А.Н. Снижение виброактивности трубопроводных систем энергетических установок // Восточно-европейский журнал передовых технологий.- 2005.- №4/2(16). - С.51-53.

7. Полищук С.М., Кипоренко А.С., Манузин А.А., Баранов А.Н. Метод расчета трубопроводных систем энергетических установок при высокочастотном нагружении // Системи обробки інформації. Зб. наук. праць. -Харків. Харківський університет Повітряних сил, 2006. – Вип. 3(52).- С.16-21.

8. Кипоренко А.С. Методы диагностики вибрации и результаты экспериментального обследования дренажного трубопровода ПВД-5 в ПНД-4 ОП ЮУАЭС // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА – 2006.- Вип. 39. – С. 292-296.

9. Полищук С.М., Кипоренко А.С. Метод оценки вибропрочности трубопроводов, опор и подвесок энергоблоков АЭС // Восточно-европейский журнал передовых технологий.–2007.- №2/3(26). – С. 25-28.

10. Жовдак В.А., Кипоренко А.С., Локошко В.В. и др. Применение информационных технологий для прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов АЭС. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. –Харків: НТУ «ХПИ». - 2008. - №36.- С. 65-74.

11. Кипоренко Г.С. Унификация трубопроводных систем атомных станций по классам безопасности с учетом различных типов нагружения // Энергосбережение•Энергетика•Энергоаудит. – 2009. - №6(64). – С. 22-28

12. Кипоренко А.С., Трищ Р.М., Полищук С.М. Нормативное

обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводов системы охлаждения активной зоны АЭС. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». -2009. - №16.- С. 70-80.

13. Кіпоренко Г.С., Тріщ Р.М., Арпентьев Б.М. Стандартизація розрахунку експлуатаційної безпеки трубопроводів атомних електростанцій. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». – 2009. - №3(132). – С. 61-65.

АНОТАЦІЯ

Кіпоренко Г.С. Удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. – Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, 2009.

Дисертація присвячена рішенням науково-технічної задачі – створенню нормативного забезпечення безпечної експлуатації трубопровідних систем атомних станцій на основі розробки науково-обґрунтованої математичної моделі розрахунку їх залишкового ресурсу при різних типах навантаження.

Зроблено систематизацію трубопроводів за класами безпеки, середовищем теплоносія і критеріями, що характеризують їх технічний стан, та запропоновано удосконалення класифікації трубопроводів. Створено алгоритмічну модель прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів атомних станцій, що мають дефекти від ерозійно-корозійного зносу при впливі вібраційного навантаження. Запропоновано уніфікацію опор відповідно до класифікації трубопроводів та проведено дослідження оптимального розміщення додаткових опор на трубопроводі для зменшення їх вібраційного навантаження, що дозволяє продовжити їх ресурс та підвищити експлуатаційну безпеку АЕС.

На підставі досліджень розроблено нормативний документ галузевого рівня.

Ключові слова: вібрація, ерозійно-корозійний знос, атомна електростанція, трубопровідні системи, залишковий ресурс, експлуатаційна безпека, нормативне забезпечення.

АННОТАЦИЯ

Кипоренко А.С. Усовершенствование нормативного обеспечения

эксплуатационной безопасности трубопроводных систем атомных электростанций. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 – стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. – Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков, 2009.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи – созданию нормативного обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводных систем атомных станций на основе разработки научно-обоснованной математической модели расчета их остаточного ресурса при разных типах нагружения.

В атомной энергетике оценка и прогнозирование ресурса трубопроводных систем является одной из задач по обеспечению безопасной эксплуатации АЭС. Решение задачи определения остаточного ресурса трубопроводов атомных станций в настоящее время проводится по выборочным параметрам: вибрации, малоцикловым нагрузкам или эрозионно-коррозионному износу. Установлено, что для создания эффективного механизма определения и управления сроками эксплуатации трубопроводов необходимо комплексное решение задачи расчета остаточного ресурса с учетом всех параметров нагружения.

Проведена систематизация трубопроводных систем по классам безопасности, среде теплоносителя и параметрам нагружения. На основе систематизации предложена классификация трубопроводов, которая конкретизирует и увеличивает объем информации для определения остаточного ресурса трубопровода. Используя систематизацию и классификацию трубопроводов, был выбран один из важнейших в системе безопасности АЭС трубопровод, который подвержен вибрации и эрозионно-коррозионному износу, и предложена математическая модель определения остаточного ресурса с учетом параметров нагружения.

Построена расчетная конечно-элементная модель трубопровода для определения остаточного ресурса, которая дала возможность смоделировать дефект от эрозионно-коррозионного износа. Доказано, что данная модель более точно описывает напряженно-деформированное состояние трубопровода, чем предлагаемая «Нормами расчета на прочность...» стержневая модель. Предложенная математическая модель дала возможность разработать пошаговый алгоритм определения остаточного ресурса при двухчастотном нагружении и эрозионно-коррозионном износе. На основании полученных данных разработана типизированная система расчета

остаточного ресурса при разных типах нагружения.

Проведены экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик трубопровода, и сделан сравнительный анализ с данными, полученными расчетным путем. Высокая сходимость результатов говорит о правомерности предложенной математической модели определения остаточного ресурса.

На основе проведенных расчетно-экспериментальных исследований и полученных данных на Южноукраинской и Ровенской АЭС за весь период эксплуатации различных трубопроводов приведены кривые зависимости напряжения, которые возникают в металле трубопровода при разных типах нагружения от количества циклов нагружения в процессе эксплуатации.

Разработана унификация опор в соответствии с классификацией трубопроводов и предложена схема рационального размещения дополнительных опор на трубопроводе. Экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик трубопровода до и после установки опор показали, что уровень вибрации снизился на порядок после установки дополнительных опор. Данные расчетных и экспериментальных исследований после установки дополнительных опор имеют высокую сходимость (до 95%), что подтверждает правомерность предложенных нормативных рекомендаций для повышения обеспечения безопасной работы трубопроводов АЭС в процессе эксплуатации и оценки их остаточного ресурса.

На основании проведенных расчетно-экспериментальных исследований, предложенной систематизации трубопроводов атомных электростанций, типизации расчета их остаточного ресурса, разработанных зависимостей напряжений, возникающих в трубопроводе от количества циклов нагружения, предложенной унификации опор и их рационального размещения на трубопроводе для повышения эксплуатационной безопасности разработан нормативный документ отраслевого уровня НАЭК «Энергоатом» Украины – МВ-Т.0.27.003-09 «Методика виброобследования трубопроводных систем АЭС», подготовленного соответственно к плану стандартизации НАЭК «Энергоатом» Украины на 2009г.

Ключевые слова: вибрация, эрозионно-коррозионный износ, атомная станция, трубопроводные системы, остаточный ресурс, эксплуатационная безопасность, нормативное обеспечение.

ANNOTATION

Kiporenko A.S. The improv of the normative providing of nuclear power

plants pipeline systems safety. - Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences by speciality 05.01.02 - standardization, certification and metrology providing. - Ukrainian engineering-pedagogical academy, Kharkov, 2009.

Dissertation is devoted to the decision of scientific and technical task – creation normative providing of safe exploitation of the nuclear station pipeline systems on the basis of scientific-technical mathematical model development of their remaining resource calculation at different types of loading.

Systematization of pipelines by the class of safety, coolant environment and criteria which characterize their technical state was done, and it is suggested to improve pipelines classification. The algorithmic model nuclear power plant pipelines remaining resource prognostication which have defects from the erosive-corrosive tearing down influenced by the vibration loading was created. Unification of supports is offered according to classification of pipelines and the conducted researches of the optimal location of additional supports on a pipeline for diminishment of their vibration loading, that allows to prolong their resource that increases operating safety of NPP.

On the basis of researches the document of particular branch level was developed.

Key words: vibration, erosive-corrosive tearing down, nuclear powerplant, pipeline systems, remaining resource, operating safety, normative providing.