

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

V. Zaslavskii, R. Yermolenko,
N. Sakhno, I. Kadenko

SOFTWARE FOR NPP STEAM GENERATORS SAFE OPERATION

The problem of NPP steam generators state control and method for it's solution are considered based on original software developed for operation of inspection data to ensure NPP safe operation.

Рассмотрена проблема контроля состояния парогенераторов АЭС и метод ее решения на основе оригинального разработанного авторами программного обеспечения для оперирования результатами этого контроля для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС.

Розглянуто проблему контролю стану парогенераторів АЕС та метод її вирішення на основі оригінального розробленого авторами програмного забезпечення для оперування результатами цього контролю для забезпечення безпечної експлуатації АЕС.

© В.А. Заславський,
Р.В. Єрмоленко, Н.В. Сахно,
І.М. Каденко, 2009

УДК 004.6 : 004.42

В.А. ЗАСЛАВСЬКИЙ, Р.В. ЄРМОЛЕНКО,
Н.В. САХНО, І.М. КАДЕНКО

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕЧНОЮ ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ АЕС

Вступ. Безпечна експлуатація атомних електростанцій (АЕС) є абсолютною вимогою для працюючих ядерних енергоблоків і майбутніх проектів, що розробляються у зв'язку з настанням ренесансу у світовій ядерній енергетиці. Велика увага приділяється як безпеці АЕС в цілому, так і її окремим важливим складовим [1, 2]. Серед основного обладнання АЕС з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР) особливе місце займають парогенератори (ПГ) [3], призначені для вироблення сухої пари, що, окрім інших підсистем, містять у своєму складі теплообмінні труби (ТОТ). Безпека та ефективність експлуатації АЕС залежать від цілісності ТОТ, тому що їх стінки з визначеною проектною товщиною є єдиною границею між першим та другим контурами АЕС з ВВЕР.

Внаслідок взаємодії з водою та хімічними сполуками, механічних навантажень тощо ТОТ ПГ під час експлуатації піддаються впливу різноманітних деградаційних процесів, що класифікуються наступним чином:

- хімічні: корозія під напруженням, пітінгова корозія тощо;

- механічні: зношення внаслідок тертя у місцях розташування дистанціонуючих та антивібраційних решіток при вібрації ТОТ, що виникає внаслідок перепаду тиску між першим та другим контурами.

Своєчасне виявлення несучільностей в ТОТ та правильне визначення їх параметрів дає можливість попередити утворення нас-

крізних ушкоджень ТОТ, накопичення яких може призвести до передчасного виходу з ладу ПГ в цілому.

При управлінні безпекою, проведенні технічного обслуговування та забезпеченні довготривалої експлуатації ПГ важливу роль відіграють результати проведення вихрострумового методу контролю (ВСК) ТОТ, на підставі аналізу яких приймаються обґрунтовані рішення щодо надійності функціонування ПГ. Актуальність проведення ВСК пояснюється як вимогами до безпеки АЕС, так і економічними аспектами: вартість позапланової зупинки блоку АЕС може складати до 1 млн доларів США, а заміна одного ПГ на АЕС потребує навіть значно більших коштів.

Застосування методу ВСК для виявлення дефектів. На АЕС України експлуатуються два типи ПГ: на реакторах ВВЕР-440 – ПГ типу ПГВ-440 (всього 6 ПГ на одному блоці), а реакторах ВВЕР-1000 – ПГ типу ПГВ-1000 (всього 4 ПГ на блоці). В табл. 1 наведено зведені дані різних типів ПГ АЕС, а в табл. 2 – характеристики ПГ типу ПГВ-1000М, що експлуатується на реакторах ВВЕР-1000.

ТАБЛИЦЯ 1. Характеристики ПГ, що експлуатуються на АЕС в Україні

АЕС	Номер блоку	Початок експлуатації	Типи реакторів ВВЕР	
Хмельницька АЕС	1	12/1987		1000/В320
	2	08/2004		1000/В320
Рівненська АЕС	1	12/1980	440/В213	
	2	12/1981	440/В213	
	3	11/1986		1000/В320
	4	10/2004		1000/В320
Південноукраїнська АЕС	1	12/1982		1000/В302
	2	12/1984		1000/В338
	3	09/1989		1000/В320
Запорізька АЕС	1	11/1984		1000/В320
	2	06/1985		1000/В320
	3	12/1986		1000/В320
	4	12/1987		1000/В320
	5	07/1989		1000/В320
	6	10/1995		1000/В320

ПГ у розрізі представлено на рис. 1, а схема функціонування полягає у наступному: з реактора до гарячого колектора ПГ подається вода при температурі 322°C, що після проходження через ТОТ охолоджується й надходить до холодного колектора, з якого вона подається до головного циркуляційного насоса, потім – до корпусу реактора. Гарячий колектор призначено для збору води та перерозподілу її між ТОТ, в той час як холодний колектор, навпаки, використовується для збору води з ТОТ та відведення її трубопроводами до корпусу

реактора. У розгорнутому вигляді колектор має вигляд перфорованої поверхні з отворами для ТОТ (рис. 2).

ТАБЛИЦЯ 2. Характеристики парогенератора ПГВ-1000М

Тип реакторної установки	ВВЭР-1000
Тип ПГ	ПГВ-1000 М
Число теплообмінних труб, шт.	11000
Ряди	Від 1 до 110
Колони	Від 1 до + 119 Від 1 до - 119
Зовнішній діаметр ТОТ	16 мм
Товщина стінок ТОТ	1,5 мм
Товщина стінки колектора в перфорованій частині	171 мм
Число дистанціонуючих решіток	30
Число антивібраційних решіток	10
Кількість гибів ТОТ радіусом R = 60 мм	Від 5 до 7
Довжина ТОТ	Від 9400 мм до 15400 мм
Діаметр ПГ	3 м
Довжина ПГ	10 – 11 м

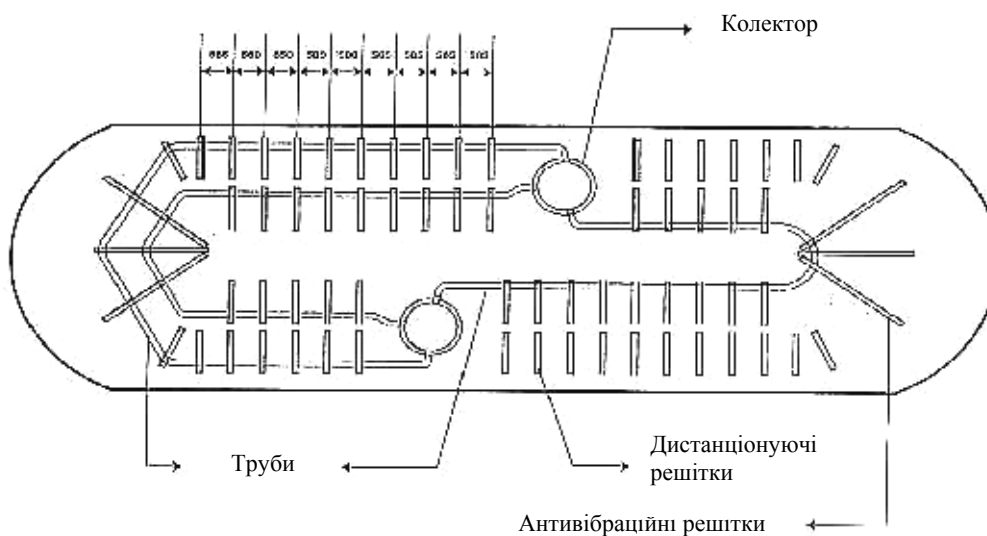


РИС. 1. ПГ у розрізі: верхній колектор ПГ – холодний, нижній колектор ПГ – гарячий

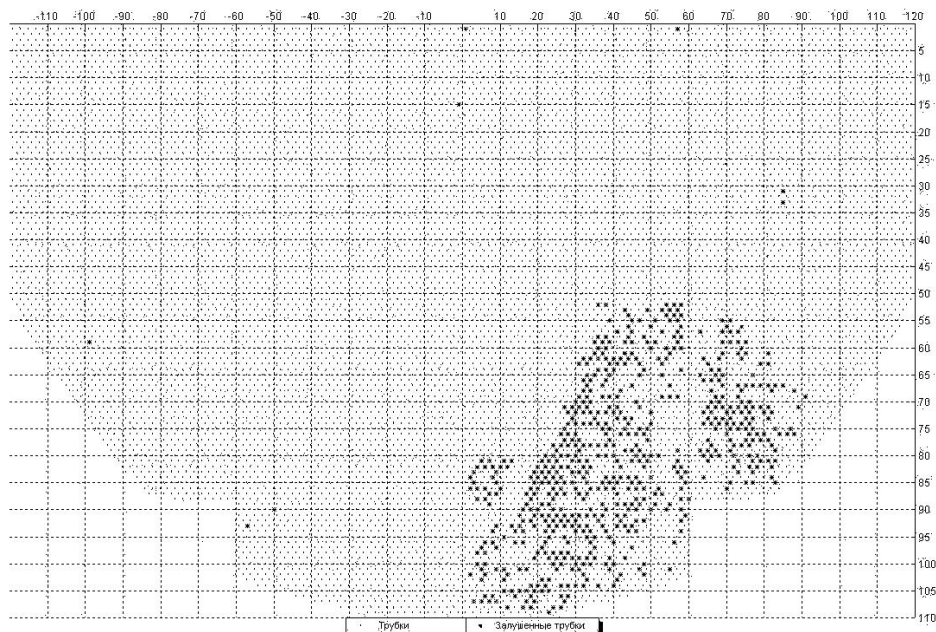


РИС. 2. Розгортка ТОТ колектора ПГ

Починаючи з 1996 р. на всіх АЕС України під час кожного планово-попереджувального ремонту для забезпечення цілісності ТОТ проводиться ВСК визначеної кількості ТОТ кожного ПГ на блоці. Серед методів контролю цілісності ТОТ метод ВСК є найбільш прийнятним, оскільки у порівнянні з іншими методами (ультразвуковий контроль, течієпошук тощо) має наступні переваги:

- висока швидкість здійснення контролю;
- відсутність необхідності у контактних матеріалах;
- можливість застосування дистанційних засобів, що мінімізує дози опромінення персоналу АЕС;
- висока надійність та досить висока чутливість методу;
- більш висока прецизійність визначення місць розташування дефекту.

Разом з тим, як і інші методи неруйнівного контролю, ВСК має не тільки переваги. Тому для підвищення надійності результатів контролю цілісності ТОТ та для забезпечення високої ймовірності виявлення дефектів використовують комплекс різноманітних методів контролю, різних за своєю природою та техніко-економічними характеристиками (у тому числі неруйнівний контроль) [4]. Враховуючи обмеженість часу на проведення контролю цілісності ТОТ, саме ВСК

є основним методом, якість проведення якого додатково контролюється методом гідровипробувань усього першого контуру, у тому числі ТОТ [5].

Важливою частиною проведення ВСК ТОТ ПГ є інформаційний моніторинг, комп'ютерна цифрова обробка даних, їх збереження, відображення та аналіз виявлених сигналів з метою прийняття відповідних обґрунтованих рішень щодо оцінки стану ПГ.

При аналізі інформації про несущільності систематично проводиться порівняння даних ВСК про сигнали, пороги їх виявлення та параметри вимірювання, що отримані як з еталонних зразків так і з реальних ТОТ ПГ.

На підставі практичного досвіду проведення контролю стану ТОТ ПГ АЕС було виявлено, що на ТОТ ПГ мають місце механічні та корозійні ушкодження різного типу. Найбільш поширеними дефектами на ТОТ є корозійне ушкодження, у тому числі міжкристалічне розтріскування, фреттінг-корозія тощо [6]. Крім того, на ТОТ визначено зони, що найбільше піддаються впливу корозії. Одна із таких небезпечних зон розташована на шляху руху води з допоміжної системи продувки ПГ від гарячого колектора у сторону холодного (рис. 3). Найбільш небезпечною є зона „А” решіток з причини накопичення солей, осадів, а також механічного напруження між решітками та ТОТ.

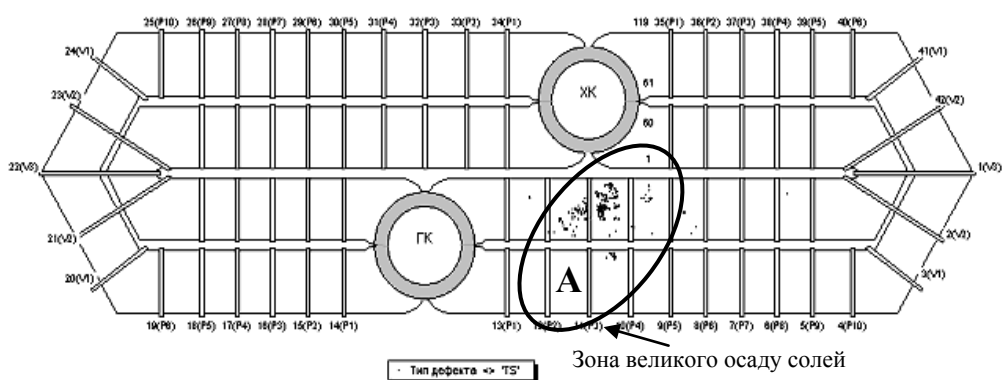


РИС. 3. Небезпечна зона (зона А) виникнення дефектів у ТОТ ПГ

При виникненні та розповсюдженні дефекту ТОТ та з їх подальшим протіканням зазначені дефектні ТОТ згідно з прийнятими в ядерній енергетиці вимогами [7] виводять з експлуатації методом глушіння під час зупинення енергоблоку.

Прогнозування стану ТОТ ПГ. Статистичні дані, що отримуються під час контролю, є основою для проведення не тільки аналізу, але й прогнозування можливого ушкодження кожної ТОТ ПГ, планування часу її виведення з експлу-

атації та часу заміни ПГ, тобто управління безпечною, тривалою та надійною експлуатацією ПГ.

У роботі [8] описується запропонована система, що дозволяє вивчати вплив різних типів деградаційних чинників на стан ТОТ та їх глушіння з метою забезпечення стану ПГ.

Розглянуто два основні типи дефектів, що зустрічаються на ТОТ, а саме: корозійне розтріскування труби зі сторони першого контуру (внутрішня поверхня труби) та зі сторони другого контуру (зовнішня поверхня труби).

Розроблено математичну модель, що дозволяє здійснювати прогноз, базуючись на статистичних критеріях, щодо числа ТОТ, які потрібно вивести з експлуатації та/або відновити, в залежності від збільшення розміру дефектів, що вже існують в них, і числа індикацій (значень) вихрострумівових сигналів, що виявлено вперше. При розробці моделі виділено три фази [8]:

- фаза 1 – компіляція та впорядкування даних;
- фаза 2 – кількісний аналіз: оцінка числа ушкоджених ТОТ при $(n + 1)$ зупиненні реактора на планово-попереджувальний ремонт;
- фаза 3 – якісний аналіз: виявлення кількості ТОТ, що необхідно виводити з експлуатації, в залежності від поточних проміжних значень параметрів критерію глушіння ТОТ.

На етапі виконання фази 1 в [8] приймаються до уваги такі аспекти як випадковість відібраних зразків, репрезентативність та гомогенність даних. Графік проведення контролю визначається числом проконтрольованих трубок, що є відносним параметром, який відображає вибірку при кожному зупиненні блоку. У роботі [8] зазначається, що всі ТОТ ПГ, тобто 100 % від загальної кількості, в середньому контролюються протягом кожних $(5 \div 7)$ років.

Фаза 2 дозволяє вирішувати проблему прогнозування числа ушкоджених ТОТ при $(n + 1)$ зупиненні реактора на кожному ПГ кожного з блоків АЕС. Виходячи з показників надійності та процесів відмови компонентів важливим є вибір функцій розподілу, що найкраще відображають процес, який досліджується. Суттєвим є вивчення величини нев'язки, що з'являється при середньо- та довготерміновому прогнозі, враховуючи число ушкоджених ТОТ в залежності від вибраної функції розподілу.

Під час виконання цієї фази авторами запропоновано [8] проводити аналіз для тріщин із зовнішньої сторони труби (другого контуру) з використанням логнормального розподілу, а із внутрішньої сторони (першого контуру) – із використанням функції щільності розподілу Вейбула.

Фаза 3 присвячена розрахункам розмірів дефектів та базується на параметрах, що використовуються при визначенні критерію глушіння, а також на розробленій моделі для визначення оцінки дефектів з метою прогнозування стану ПГ на момент наступного розхолодження та зупинення реакторної установки.

Для тріщин із зовнішньої сторони трубки вибралась такі параметри [8]: глибина дефекту та амплітуда сигналу. При дослідженні розтріскування ТОТ із внутрішньої сторони було введено нові змінні, що інтегрують інформацію щодо

максимальної довжини дефектів на зовнішній стороні та розташуванні тих дефектів, що є суттєвими при застосуванні відповідного критерію глушіння.

Після визначення змінних для обох типів дефектів авторами підраховано [8] функції щільності розподілу з метою пояснення вже існуючих даних та подальшого використання цих функцій у прогностичній моделі. Для визначення функції щільності розподілу було використано так званий метод покриття, що забезпечує неперервність функції з прийнятним ступенем гладкості.

Для проведення такого моделювання необхідно оперувати даними, зібраними під час всіх попередніх проведених ВСК ТОТ ПГ [8].

На сьогодні на АЕС в Україні експлуатують 3 системи ВСК, що були поставлені в рамках міжнародних програм від різних виробників (Harmonic 210/Siemens (РАЕС), MIZ-30/SM-14 (ЗАЕС), TEDDY/Тecnatom (ЮУАЕС)), кожна зі своїм технічним та програмним забезпеченням (ПЗ) для управління, збору та обробки даних. У рамках проектів фахівці АЕС пройшли навчання у виробників цих систем ВСК.

У поставлених системах існують деякі відмінності в методиках збору та при проведенні аналізу даних ВСК, а ПЗ, що забезпечує функціонування кожної з цих систем, не дозволяє оперувати даними попередніх проведених ВСК на блоках.

Разом з тим використання даних попереднього контролю є необхідним при плануванні проведення наступних ВСК та прогнозуванні подальшого стану ТОТ ПГ, формуванні бази даних (БД) по дефектах ТОТ ПГ, оцінці надійності отриманих результатів ВСК, їх інтерпретації фахівцями тощо. Все це вимагає розробки ПЗ, що надає можливості збереження та оперування зазначеними статистичними даними ВСК ТОТ ПГ.

Програмне забезпечення для обробки та аналізу результатів ВСК. Для оперування даними при проведенні ВСК авторами розроблено оригінальне ПЗ EddyReport 3.0 [9], що дає можливість зберігати та обробляти отримані дані ВСК ТОТ ПГ, які попередньо обробляються програмою аналізу первинної інформації (рис. 4), що входить до складу системи ВСК, та документувати результати. Розроблене ПЗ дозволяє:

- формувати та підтримувати БД за результатами ВСК ТОТ для кожного ПГ;
- модифікувати інформацію в БД шляхом внесення даних щодо нових виконаних контролів, заглушених ТОТ, магнітних носіїв, на яких зберігаються первинні результати обробки;
- виконувати інтерактивний аналіз результатів ВСК;
- отримувати вибірки результатів ВСК з наступною їх візуалізацією у графічному та/або текстовому форматах (розгортка колектора (1-а проекція ПГ) та схема розташування дистанціонуючих та антивібраційних решіток (2-а та 3-я проекції ПГ) (рис. 5, 6));
- формувати звіти різних структур (форм) у форматі Microsoft Excel 97/2000.



РІС. 4. Блок-схема програмного забезпечення EddyReport 3.0

Трубы с дефектами				
ОП Ровенская АЭС		Блок № 3		Парогенератор № 2
Трубы с дефектом СЕ				
ППР-98				
Труба	Колонна	Подтип дефекта	Глубина, анализ1	Глубина, анализ2
105	+033	DDE	53	55
[конец подгруппы]			ППР-98	
ППР-99				
Труба	Колонна	Подтип дефекта	Глубина, анализ1	Глубина, анализ2
075	+043	DDE	90	84
105	+033	NA	51	
[конец подгруппы]			ППР-99	
[конец группы]			СЕ	
Трубы с дефектом СН				

РІС. 5. Форма звіту про стан труб з дефектами

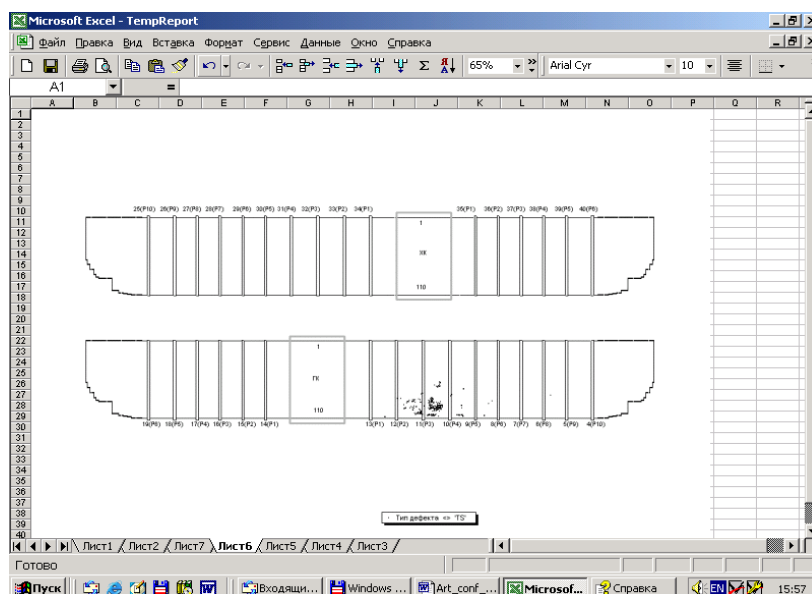


РИС. 6. Форма звіту програмного забезпечення EddyReport 3.0 про розташування ТОТ з дефектами в ПГ

EddyReport 3.0 успішно використано для статистичного аналізу результатів ВСК ТОТ ПГ РАЕС-3 [10] з метою підвищення надійності результатів ВСК та ефективності експлуатаційного неруйнівного контролю в цілому.

EddyReport 3.0 розроблена у системі ОС MS Windows з інтерфейсом MS Windows.

При розробці ПЗ використано об'єктно-орієнтований підхід, розроблено об'єкти типу *Проект*, *Контроль* та *Звіт*.

Об'єкт типу *Контроль* – це набір даних, що належать до одного ВСК одного ПГ, які зберігаються у вигляді переліку файлів. Реалізовано функції оперування з цими даними.

Об'єкт типу *Проект* – це сукупність всіх проведених ВСК одного ПГ. Всі дані, що належать до цього *Проекту*, утворюють БД, з якої формується вибірка результатів при підготовці звіту по ВСК ПГ.

Реалізовано допоміжні функції, що забезпечують зберігання та використання додаткових даних (унікальних даних по ПГ та результатах контролю).

Об'єкт типу *Звіт* – це набір параметрів, що визначають зміст та форму звітних документів, які формуються в MS Excel.

З метою захисту обмеження доступу при модифікації даних EddyReport 3.0 має два рівні доступу: *Користувач* та *Адміністратор*.

У режимі "*Користувач*" система дозволяє виконувати інтерактивний аналіз даних, формувати вибірки з БД, готувати графічне та/або текстове представлення результатів ВСК з подальшою підготовкою звітних документів. На даному рівні не дозволяється вносити чи модифікувати інформацію в БД.

У режимі “Адміністратор” (доступ з паролем) виконуються всі дії, що передбачені в режимі “Користувач”, крім того існує можливість модифікації даних та реконфігурація БД.

ПЗ дозволяє одночасно працювати тільки з одним проектом (*поточним проектом*) та тільки з одним звітом (*поточний звіт*). Кожен проект та звіт – це набір результатів ВСК даного ПГ. Поточний проект та поточний звіт вибираються користувачем з БД для опрацювання.

Висновки. Розроблене ПЗ EddyReport 3.0 дозволяє оперувати даними з БД, що отримані за результатами проведення попередніх ВСК ТОТ ПГ АЕС, проводити їх аналіз з метою прийняття рішень стану ТОТ ПГ, вивчати тенденцію деградації ТОТ ПГ, оптимально планувати проведення подальших ВСК, прогнозувати зміни стану ТОТ ПГ в майбутньому та, виходячи з досвіду інших АЕС, приймати завчасні заходи щодо безпечної експлуатації як енергоблоку, так і АЕС у цілому.

На сьогодні розроблена система EddyReport 3.0 є комерційним продуктом та успішно експлуатується на деяких АЕС України [9].

1. *Основные принципы безопасности атомных электростанций.* – Серия изданий по безопасности № 75-INSAG-3: Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. – МАГАТЭ. – Вена, 1989. – 92 с.
2. *НПЗ06-2-141-2008.* Загальні положення безпеки атомних станцій. – ДКЯРУ– 2008.– 45 с.
3. *ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность /* А.М. Афров, С.А. Андрущечко, В.Ф. Украинцев и др. – М.: Университ. книга, Логос, 2006. – 488 с.
4. *Заславский В.А., Каденко И.Н.* Роль и место методов неразрушающего контроля для обеспечения надежности и долговечности сложных систем с высокой ценой отказа // Информационно-рекламный бюллетень “Неразрушающий контроль.” – 1999. – № 1– С. 15 – 22.
5. *СТП 0.03.024-2005.* Стандарт предприятия. Контроль неразрушающий. Пневмогидравлический аквариумный способ контроля герметичности межконтурной плотности парогенераторов: Методика контроля. – ГП НАЭК «Энергоатом», 2005. – 14 с.
6. *Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Веселов Д.О., Драгунов Ю.Г.* Парогенераторы – горизонтальные или вертикальные (каким быть парогенератору АЭС с ВВЭР?) // Атомная энергия. – 2008. – 105, вып. 3. – С. 127 – 135.
7. *Отраслевое техническое решение № ТР-Н.1234.03.094-06* по критериям глушения теплообменных труб парогенераторов АЭС Украины. – ГП НАЭК «Энергоатом», 2006. – 5 с.
8. *Ribes B., Perez C., Bollini G., Sanchez J.* Statistical Analysis and Model Prediction for Steam Generator Degradation // Proceedings of the 12-th Intern. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries. – 2000 – P. 108 – 114.
9. <http://www.ndef.com.ua/rus/Programs/EddyReport/index.html>
10. *Kadenko I., Yermolenko R., Kovtonyuk P., Sakhno N.* Analysis and Evaluation of Reliability of ET Results for VVER Steam Generator Tubing to Improve the ISI Effectiveness // Proc. of the Joint EC-IAEA Technical Meeting on Improvements in ISI Effectiveness, Petten, The Netherlands, 19–21 November 2002. – 9 p. – CD.

Отримано 24.11.2008