

Т. В. Ковалінська, І. А. Остапенко, В. І. Сахно, А. Г. Зелінський

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ***ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ
ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ АЕС**

Обговорюються шляхи вдосконалення технічної бази ІЯД НАН України для здійснення функціональних досліджень та нових технологій контролю стану обладнання на АЕС. Робота виконана в секторі радіаційних технологій відділу структури ядра в обсязі державної програми підвищення надійності ядерної енергетики та продовження термінів експлуатації ядерних енергетичних установок.

Ключові слова: кваліфікація, обладнання АЕС, радіаційні стенди, функціональні дослідження.

Роботи по формуванню сучасної експериментальної бази для радіаційних досліджень проводяться в ІЯД НАН України вже понад 20 років. За цей період створено унікальну радіаційну техніку [1 - 3]. На ній виконано комплексні дослідження процесів деградації матеріалів та обладнання. Було встановлено великий перелік радіаційно-хімічних, радіофізичних та електрофізичних процесів, що відбуваються в матеріалах і конструкційних елементах обладнання АЕС, які є важливими при контролі за старінням обладнання і, відповідно, його надійністю [4, 5]. Для вирішення проблеми контролю за старінням обладнання АЕС, що працює в умовах дії радіації, необхідно створити відповідну експериментальну базу та розробити методику процесу старіння обладнання АЕС і контролю за ним. Це дасть змогу встановити ресурсні можливості та доцільність подальшої експлуатації. З урахуванням низки нових нормативних вимог у світовій та українській ядерній енергетиці створення таких методів - сучасна актуальна задача. Експериментальна радіаційна установка ІЯД НАН України (далі - ІЯД) за своїми характеристиками на даний час є єдиною в Україні, де такі дослідження можна реалізувати. Її адаптація під такі дослідження до того ж є важливою стратегічною задачею і надасть можливість організації нового наукового напрямку в ІЯД - сертифікації і кваліфікації обладнання АЕС.

З метою визначення оптимальних шляхів модернізації експериментальної радіаційної установки в ІЯД були проведені експериментальні дослідження процесів, що відбуваються в обладнанні при дії радіації різного виду та енергії. Попередньо увесь перелік обладнання та устаткування АЕС, які за нормативними вимогами підлягають обов'язковій кваліфікації, було об'єднано в категорії за показниками чутливості його конструктивних елементів до іонізуючих випромінювань.

Дослідження здійснювали в полях мегавольтних електронів, змішаних γ - і β -полях та полях гальмівних випромінювань при конверсії електронів максимальною енергією 4 MeV на мішенях із важких елементів.

Було встановлено, що з усього різноманіття обладнання найбільш чутливими до радіації є органічні композиції. Найчастіше вони використовуються як ізоляційні матеріали в конструкціях електротехнічного устаткування АЕС. Їхнє випробування доцільно здійснювати вже на першому етапі реалізації програми шляхом комплексного контролю функціональної придатності (кваліфікації). Тому й експериментальну базу доцільно першочергово адаптувати під такі випробування. У цих випробуваннях необхідно встановити надійність роботи обладнання в стаціонарних, перехідних та аварійних режимах, а також вплив несприятливих зовнішніх факторів.

Підтвердженням цього є результати експериментальних досліджень ефектів і процесів, що відбуваються в поширених електротехнічних ізоляційних матеріалах під дією різних компонентів радіаційного поля, виконані в секторі радіаційних технологій [5, 6]. Результати руйнівних процесів при опроміненнях ілюструють фото, наведені на рис. 1. Дослідження здійснювались для визначення коефіцієнтів у диференційних рівняннях, що описують стан обладнання та його елементів від γ - і β -випромінювання. Опромінювались фрагменти різних ізоляційних виробів - стиролу (фото 1, 2), полівінілхлоридної ізоляції (фото 3), гумових елементів (фото 4). Було встановлено, що на відміну від традиційної думки про функціональну ідентичність впливу на органіку різних видів радіації [7] фактично процеси утворення дефектів суттєво залежать не тільки від матеріалу, але й від типу іонізуючих випромінювань [6]. На фото 1 видно ефект повного руйнування ізоляції зі стиролу під дією γ -випромінювання. По усьому об'ємі опроміненого зраз-

ка спостерігаються тріщини і він розсипається при найменшому механічному навантаженні. На фото 2 – вигляд зразка після обробки β -випромінювання дозою 20 - 50 кГр. Тут характер дефектів інший, тріщини мають вигляд дендридів – результат вибухового виділення іонізованих газів від радіолізу матеріалу під дією електронів 4 MeV [5]. Результати деструктивної дії радіації на еластичну ПВХ ізоляцію провідників наведено на фото 3. У місцях дії електронів і гальмівно-

го випромінювання ПВХ змінює структуру, прозорий за характеристиками ізоляційний матеріал набуває темного забарвлення, стає більш жорстким, аж до крихкого. На фото 4 видно, що гумовий ущільнюючий елемент після опромінення набуває консистенції аморфної речовини. Відбувається деструкція полімеру (бутилкаучуку) до початкового стану мономера, тому опромінений виріб втрачає еластичність і вже не здатен здійснювати свої функції.

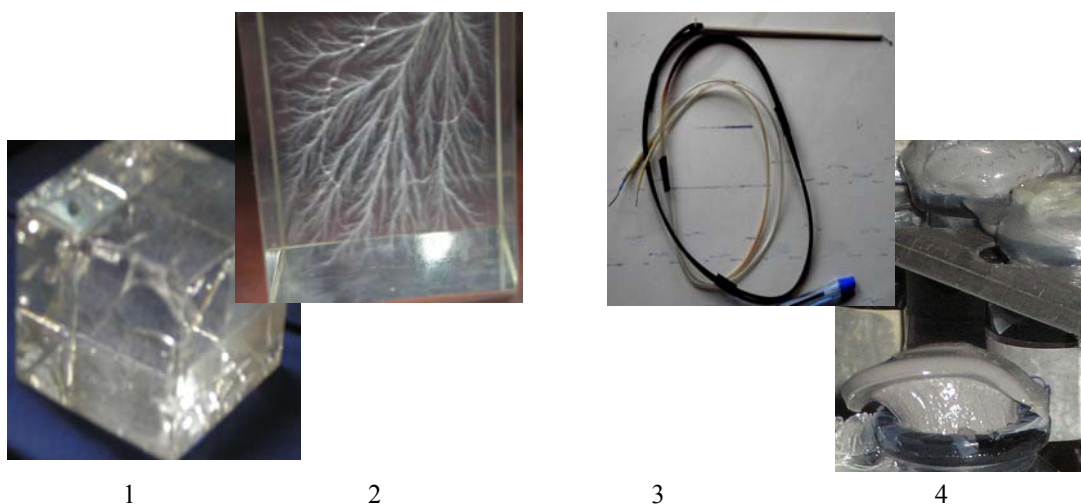


Рис. 1. Фото зруйнованих зразків електричного обладнання після дії іонізуючих випромінювань.
(Рисунок кольоровий на сайті журналу).

Це свідчить, що всі складові радіаційного поля є сильними факторами інтенсивного старіння опромінюваного обладнання й підсилюють відомі процеси «нормального» старіння, що традиційно враховуються при експлуатації обладнання на звичайних об'єктах. Ці процеси необхідно вивчати більш детально. Маючи інформацію про

особливості радіаційно-стимульованих процесів деградації, можна сформулювати надійні моделі старіння критичного обладнання на ядерних енергетичних установках.

Фактори, що найбільш суттєво впливають на надійність обладнання з органічними матеріалами узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1. Фактори впливу

Діючі фактори	Результати впливу на експлуатаційні показники обладнання
Іонізуюче випромінювання (до 10 MeV)	Радіаційне старіння: поглиблює протікання незворотних процесів (зшивання, деструкції, зміни насиченості); приводить до радіолізу повітря і матеріалів з полімерів (оболонки кабелів тощо), електризації поверхні силових кабелів, радіаційного розігріву та ін.
Вторинне випромінювання (до 0,5 MeV)	Електризація поверхні кабелів і устаткування: погіршуються електричні характеристики обладнання
Радіаційний розігрів	Підвищення температури матеріалів: прискорює деградацію властивостей конструктивних елементів; зменшується ресурс обладнання
Електричні та магнітні поля	Змінюється розподіл поглинутих доз в матеріалах: підвищується електропровідність діелектриків; змінюється перебіг радіаційно-хімічних процесів
Високі температури	Прискорюють реакції окислення: збільшується швидкість корозії
Високий (низький) тиск	Прискорюються процеси окислення: прискорено деградують оболонки кабелів; зростають механічні навантаження

Діючі фактори	Результати впливу на експлуатаційні показники обладнання
Хімічно-активні компоненти середовища	Прискорюють процеси окислення: відбувається руйнування оболонки кабельних виробів і електрообладнання під дією кисню, озону, азотної кислоти та ін.
Деактивуючі розчини	Сприяють деструкції матеріалів: знижуються механічні властивості обладнання; прискорюються темпи старіння оболонки кабелів
Волога	Стимулює активне окислення: на поверхні обладнання утворюються азотна кислота

Наведені дані свідчать, що для формування надійних експертних висновків про стан обладнання вже недостатньо мати лише матеріалознавчу інформацію (як це зараз прийнято). Необхідно контролювати більш розширений перелік параметрів, у тому числі й ті, що характеризують функції обладнання. Причому визначальну роль у всьому комплексі несприятливих факторів (параметрів експлуатації) на АЕС відіграють саме радіаційні. Вони суттєво прискорюють деградацію функцій обладнання, а тому їхнє визначення та урахування є визначальним аргументом його кваліфікації на придатність до роботи на ядерних енергетичних об'єктах.

Уперше було експериментально доведено необхідність урахування процесів деструкції від вторинного випромінювання, яке посилює дію прямого іонізуючого випромінювання на матеріали конструкцій та сприяє електризації поверхні кабелів та устаткування. Аналіз отриманої інформації та спеціальні теоретичні дослідження свідчать, що слід очікувати суттєвого вкладу в загальні деструктивні процеси низькоенергетичного γ - і β -випромінювання (менше 0,5 МеВ).

До обладнання, на якому вивчатимуться процеси радіаційно-стимульованої деградації, з огляду на надійність експлуатації, можна віднести різні ізолятори, кабелі, інше електротехнічне устаткування. Об'єктивно ця група складає значну частину усього устаткування на АЕС. Останні результати експлуатації показали, що спостерігається стійка тенденція до зростання інцидентів на цьому обладнанні та зростання їхнього значення в експлуатації ядерних енергетичних установок [8]. За експлуатаційними даними з українських АЕС, відмови на електротехнічному обладнанні вже досягнули 60 % усіх інцидентів (рис. 2). Тому попередження цих відмов, а краще завчасне розпізнавання можливостей їхнього виникнення, є важливою задачею. В її вирішенні вузлову роль мають відіграти дослідження радіаційно-стимульованих процесів деградації функцій електротехнічного обладнання. Відповідно актуальною інженерною проблемою є створення радіаційних технічних засобів для таких досліджень.

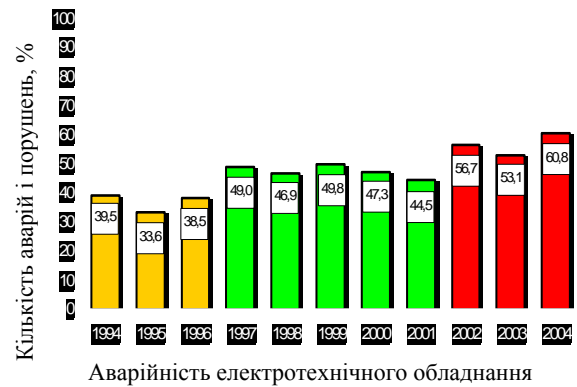


Рис. 2. Статистичні дані відмов обладнання на АЕС. (Рисунок кольоровий на сайті журналу).

З аналізу результатів були сформульовані технічні вимоги на додаткове спеціалізоване устаткування для подальшого удосконалення методик радіаційних досліджень, у першу чергу для визначення ресурсних можливостей матеріалів та електротехнічного обладнання АЕС [9, 10]. Найбільш важливими були:

- можливість опромінювати обладнання безпосередньо в робочому режимі під дією всіх експлуатаційних та екстремальних факторів;

- радіаційне поле повинне перекривати великий простір (більше 1 м^3), бути достатнім для розташування там комплектного обладнання й за своїми характеристиками максимально відтворювати умови його експлуатації на об'єктах;

- можливість відтворювати всі експлуатаційні, зовнішні та екстремальні фактори роботи на об'єкті.

Найкоротшим шляхом реалізації цих умов є адаптація під ці роботи вже існуючого радіаційно-технічного комплексу ІЯД, особливо і з економічних міркувань. З іншого боку, ІЯД зацікавлений у розширенні обсягів актуальних досліджень і в підвищенні ефективності застосування існуючої дорогої експериментальної техніки [11, 12]. Важливо лише визначити оптимальні шляхи його подальшого розвитку.

Із перелічених проблем найбільшою є формування змішаних радіаційних полів із необхідними характеристиками. Попередній цикл досліджень

дженів на прискорювачі електронів середньої енергією 4 МеВ показав, що отримати радіаційне поле в низькоенергетичному діапазоні проблематично за технічних причин. Аналогічних ви-

сновків дійшли й інші науковці. На рис. 3 показано типовий спектр гальмівного випромінювання [12], яке реально можна отримати на прискорювачі електронів.

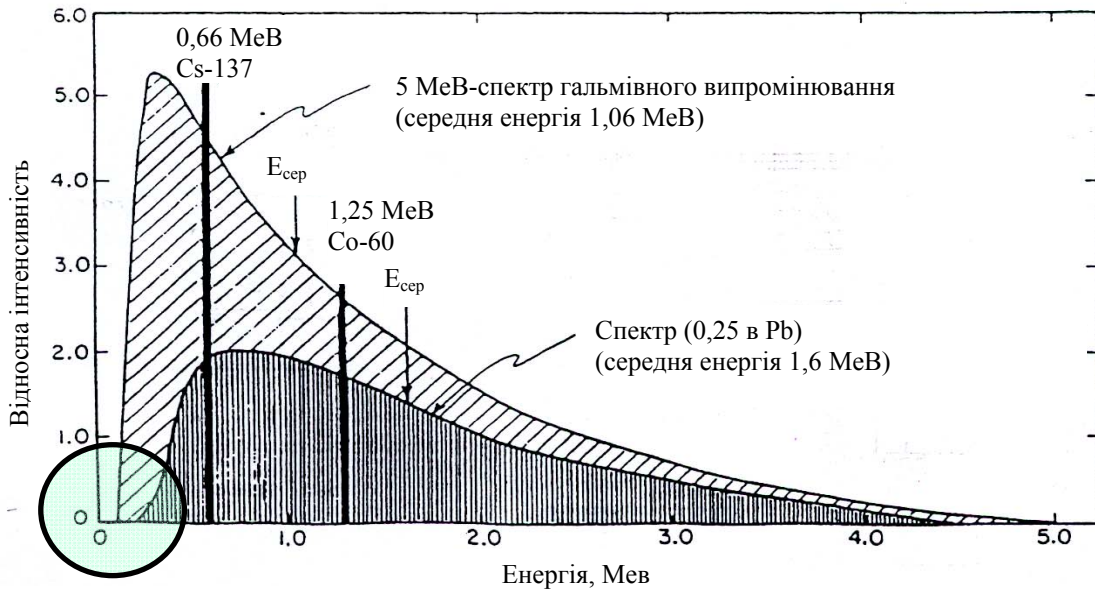


Рис. 3. Типовий спектр гальмівного випромінювання прискорювача електронів 4-5 МеВ.

У сформованих на таких прискорювачах радіаційних полях неможливо виділити низькоенергетичну компоненту гальмівного випромінювання (див. рис. 3). Тому технічно установки з прискорювачами 4 - 10 МеВ задовольняють основним вимогам функціональних випробувань обладнання АЕС, але лише у високоенергетичній області енергетичного спектра іонізуючих випромінювань, характерних для ядерних об'єктів, та за виключенням низькоенергетичної області (виділеної на рис. 3). Це свідчить, що на існуючому в ІЯД прискорювачі електронів 4 МеВ не буде можливості досліджувати деградації обладнання від дії радіації низьких енергій. Отримати таку інформацію з інших джерел також неможливо, бо дослідження деградації функцій обладнання під дією іонізуючих випромінювань низьких енергій досі не велися через відсутність необхідної технічної бази.

Для вирішення вказаної проблеми в ІЯД розроблено нову структури діючої дослідної радіаційної установки на базі прискорювача електронів з енергією 4 МеВ. В її склад включено ще одне електрофізичне джерело (прискорювач електронів до 0,5 МеВ і потужністю в пучку не менше 20 кВт), як це показано на рис. 4.

У такій конфігурації радіаційний комплекс ІЯД буде з запасом покривати весь необхідний спектр іонізуючих випромінювань і гарантовано забезпечувати виконання головних вимог здійснення прискорених випробувань – відтворення

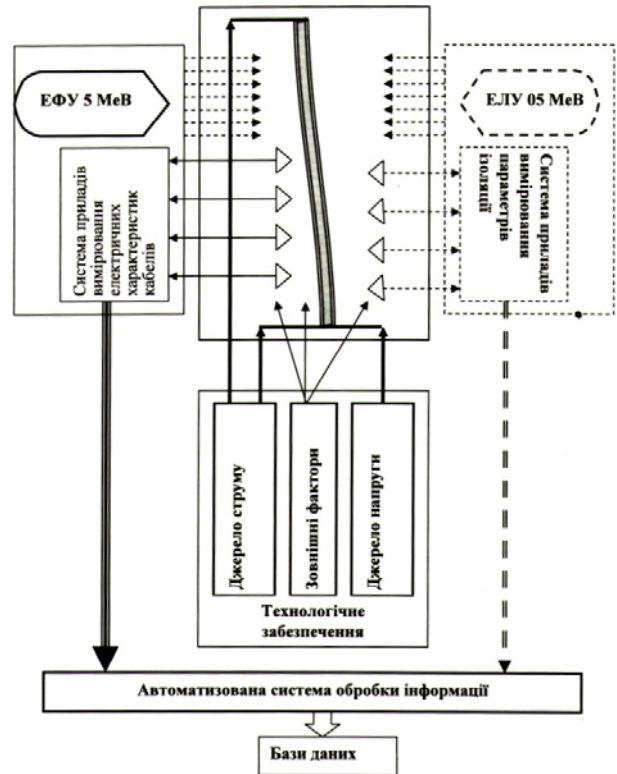


Рис. 4. Модернізована структура радіаційного дослідницького комплексу ІЯД.

умов експлуатації обладнання на АЕС. Це надасть можливість досліджувати радіаційно-стимульовані процеси деградації обладнання АЕС у низькоенергетичному діапазоні випромінювань і

компенсувати відсутність інформації про його поведінку на реальних ядерних енергетичних об'єктах.

Для реалізації цього шляху модернізації необхідно вибрати оптимальне джерело випромінювання цієї енергетичної області, технічно ввести його до складу вже існуючого дослідницького

радіаційного комплексу (установки) і створити на його базі стенд для функціональних випробувань. Дослідження ринку таких технічних засобів показали, що реальна промисловість випускає велику гаму прискорювачів на низькі енергії. Параметри найбільш придатних наведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2. Прискорювачі російських виробників

Прискорювач або тип генератора	Енергія, МеВ	Середня потужність в пучку, кВт
Електрон-4	0,5	10
Аврора-2	0,5	25
Трифазний електронний прискорювач ТРЕП-3	0,4	75

Таблиця 3. Промислові прискорювачі американських виробників

Модель	Прискорювальна напруга, кВ	Струм пучка, мА	Довжина випускного вікна, см	Потужність перед випускним вікном, кВт
Установки Electrocurtain (з термокатодом і лінійним пучком електронів)				
CB275/50/5	275	400	50	90
CB275/100/5	275	125	100	34
Установки Electrocure (з прискорювальною трубкою і скануючим пучком)				
SB300/30/20	300	25	30	7,5
SB300/50/30	300	37,5	50	11
Установки Electropulse				
Electropulse-208	200	2,5	15	0,5
Динамотрони				
Динамотрони	400	100	183	40
Динаметрони	550	50	91,5	27,5

У табл. 2 наведено прискорювачі російських виробників, а в табл. 3 – американських фірм. Практично всі вони забезпечують необхідні радіаційно-технічні характеристики джерела випромінювання і придатні для модернізації експериментальної бази ІЯД.

Прискорювачі електронів цього діапазону енергій відрізняються широким різноманіттям конструкцій і діапазоном потужностей пучків і цим сприяють вибору оптимального типу установки для нашого застосування.

У світі стабілізувалися цінові показники на таку техніку [13, 14]. Залежно від конфігурації використаних технічних засобів у конструкції таких прискорювачів їхня вартість коливається в межах 10 - 20 тис. доларів за 1 кВт пучка. Розрахунки показують, що з урахуванням наявних технологічних приміщень та інженерних комунікацій запропоноване доукомплектування дослідницького комплексу ІЯД електрофізичним джерелом 0,5 МеВ обійдеться всього в 200 - 400 тис. доларів і не потребуватиме додаткових витрат на протирадіаційних захист.

Висновки

1. Досліджено шляхи розвитку радіаційної установки в ІЯД. Запропоновано й обґрунтовано нову структуру цього дослідницького комплексу для досліджень і сертифікації обладнання для роботи на АЕС. На новому дослідницькому комплексі можна буде здійснювати кваліфікацію обладнання АЕС.

2. Запропоновано шляхи удосконалення діючої радіаційної установки з прискорювачем електронів 4 МеВ. Показано, що найбільш простим шляхом досягнення поставленої мети є створення радіаційного комплексу на базі двох електронних прискорювачів на різні енергії (4 та 0,5 МеВ) для отримання суцільного спектра випромінювання в діапазоні енергій, властивих промисловим ядерним енергетичним установкам.

3. Зроблено аналіз парку існуючих і доступних електрофізичних джерел електронів і виділено найбільш придатні для доукомплектування існуючої установки. Оцінено вартість такого комплексу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сахно В.І., Вишневецький І.М., Халова Н.В., Томчай С.П. Радіаційно-технологічна установка з лінійним прискорювачем електронів НЦ "ІЯД" НАН України // Матеріали щорічної наукової конференції інституту ядерних досліджень (Київ, 27 - 30 січня). - 1998. - С. 111.
2. Сахно В.І., Вишневецький І.М., Сахно О.В. та ін. Установка для радіаційних випробувань обладнання АЕС // Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy": Book of abstracts (Kyiv, May 29 - June 3, 2006). - 2006. - P. 188.
3. Сахно В.І., Вишневецький І.М., Томчай С.П. та ін. Проблемы создания технической базы для квалификации кабельной продукции АЭС // I Междунар. конф. «Продление срока эксплуатации энергоблоков АЭС. Оценка технического состояния и управление старением оборудования и кабельных изделий». - CD-ROM Windows 98/ 2000 NT/XP. - К., 2007.
4. Сахно В.І., Вишневецький І.М., Сахно О.В. та ін. Проблеми радіаційних випробувань кабелів АЕС на установці ІЯД // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (91). - 2007. - № 6. - С. 128 - 130.
5. Сахно В.І., Томчай С.П., Сахно О.В. Дослідження радіаційно-стимульованих факторів деградації обладнання АЕС // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних дослід. - 2001. - № 1 (3). - С.102 - 105.
6. Ковалінська Т.В. Дослідження радіаційних змін матеріалів та виробів для АЕС: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - К., 2011.
7. Иванов В.С. Радиационная химия полимеров: Учеб. пос. для вузов. - Л., 1988. - 320 с.
8. Сахно О.В. Дослідження і розробка методів та технічних засобів радіаційних випробувань обладнання АЕС на електрофізичних установках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - К., 2008.
9. Vyshnevskyy I.M., Sakhno V.I., Tomchay S.P. et al. The problems of radiation methods usage of testing the NPP's equipment // The 2-nd Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (Kyiv, June 9 - 15, 2008): Proceedings. - Kyiv, 2009. - P. 699 - 702.
10. Сахно В.І., Вишневецький І.М., Сахно О.В. та ін. Спеціалізований стенд для функціональних випробувань кабельних виробів АЕС // Ядерна фізика та енергетика. - 2007. - №1 (19). - С. 140 - 144.
11. Сахно В.І., Вишневецький І.М., Зелінський А.Г. та др. Радіаційна установка з ускорителем електронів ІЯІ НАН України // Атомная энергия. - 2003 - Т. 94, вып. 2. - С. 163 - 166.
12. Сахно В.І. Створення електрофізичних радіаційних установок та дослідження змін властивостей матеріалів при промислових радіаційних технологіях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - К., 2009.
13. Свинын М.П. Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей для радиационной технологии. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 143 с.
14. Radiation processing: environmental applications. - Vienna: IAEA. - 2007. - P. 25.

Т. В. Ковалинская, И. А. Остапенко, В. И. Сахно, А. Г. Зелинский

**ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ
ДЛЯ КВАЛИФИКАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

Обсуждаются пути совершенствования технической базы ИЯИ НАН Украины для осуществления функциональных исследований и новых технологий контроля состояния оборудования на АЭС. Работа выполнена в секторе радиационных технологий отдела структуры ядра в объеме государственной программы повышения надежности ядерной энергетики и продления сроков эксплуатации ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: квалификация, оборудование АЭС, радиационные стенды, функциональные испытания.

T. V. Kovalinska, I. A. Ostapenko, V. I. Sakhno, A. G. Zelinsky

**WAYS OF IMPROVEMENT OF RADIATION TECHNIQUES
FOR THE QUALIFICATION OF NUCLEAR POWER PLANTS' EQUIPMENT**

Ways of the improvement of technical base of the INR of NAS of Ukraine for functional researches and new technologies of control over the state of the equipment on NPPs are discussed. The scientific work is completed in the department of radiation technologies within the national program of the enhancement of the reliability of nuclear energetic and the prolongation of operation terms of nuclear power installations.

Keywords: qualification, nuclear power plants' equipment, radiation stands, functional tests.

Надійшла 11.10.2012

Received 11.10.2012