

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

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

**ТЕХНОЛОГІЯ РІВНОМІРНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ  
ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ ВЕЛИКИХ ГАБАРИТІВ**

Викладено результати досліджень і розробок методів радіаційної обробки матеріалів і промислових виробів великих габаритів, які надали можливість максимально повно використовувати технологічні переваги опромінення зарядженими частинками й розширили використання радіаційної техніки в різних галузях сучасного виробництва і науки.

*Ключові слова:* радіаційні стенди, опромінення, функціональні дослідження, радіаційна установка.

Сучасні ядерні та радіаційні прикладні дослідження спрямовані на отримання даних про численні ефекти, які відбуваються в об'єктах, що опромінюються іонізуючими випромінюваннями та зарядженими частинками – так звані радіаційно-стимульовані ефекти [1]. Виникають проблеми точності радіаційних досліджень при опроміненні складних об'єктів, що складаються з різних матеріалів (обладнання, композитні матеріали, харчові продукти з різко вираженою гетерогенною структурою). Тут необхідно враховувати характеристики поля опромінення та його динаміку в часі. Радіаційна установка ІЯД НАН України створювалась як багатоцільовий дослідницький комплекс для вирішення актуальних задач у різних галузях фундаментальної і прикладної науки, для чого в її складі передбачено

багатопараметричну систему радіаційних і технічних вимірювань. Значну увагу при її створенні було приділено вирішенню проблеми опромінення зразків великих розмірів.

Дослідження та розробки технологій (радіаційної обробки) зразків великих габаритів завжди є актуальною науковою, технічною і технологічною проблемою. На радіаційній установці сектора радіаційних технологій (СРТ) вирішення такої проблеми необхідне також і для потреб розвитку технологій випробувань радіаційної стійкості функцій критичного обладнання АЕС [2].

Традиційно в промислових радіаційних технологіях для опромінювання використовуються пучки електронів діаметром 3 - 10 мм, виведені з прискорювача в простір реакційної камери через тонку фольгу (рис. 1).

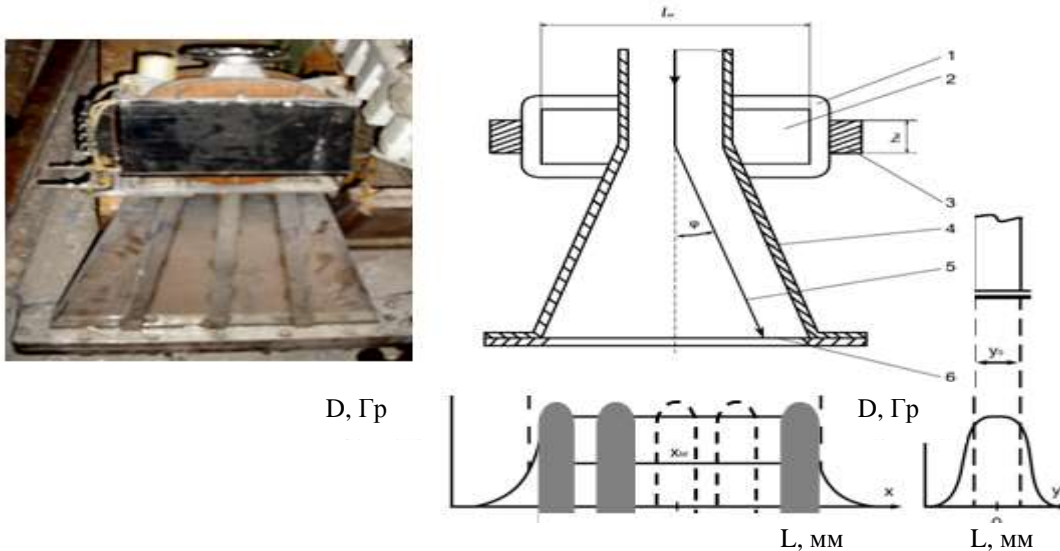


Рис. 1. Традиційна технологія опромінення на промислових прискорювачах електронів:  
1 – обмотка; 2 – полюс магніту; 3 – ядро; 4 – вакуумна камера; 5 – траєкторія електрона; 6 – випускне вікно.

Особливістю цього методу є постійне сканування вузьким пучком по поверхні мішені-зразка, яке здійснюється магнітним полем. Розміри опромінюваного поля залежать від енергії електронів і для прискорювача 4 МеВ, на базі якого утворена радіаційна установка в СРТ, довжина розгортки становить 40 см. Інші параметри

установки такі: габарити – 1 × 0,5 × 0,5; маса – 75 кг; споживання потужності – 5,5 кВт; матеріал випускного вікна – титан; охолодження – комбіноване; ресурс – 500 - 600 год.

На рис. 2 показано результати опромінення електронами складної мішені за найпростішою

© Т. В. Ковалінська, І. А. Остапенко, В. І. Сахно, 2016

схемою. Виявилось, що навіть при виконанні всіх рекомендованих методів рівномірного опромінювання (наприклад, обертання виробу за допомогою спеціального електропривода) важко забезпечити виконання сучасних метрологічних вимог. На рисунку наведено графік фактичного розподілу поглинутої дози (ПД) у площині мішені при опроміненні на імпульсному резонансному прискорювачі електронів. Він ілюструє дуже велику різницю поглинутої дози фрагментами мішені великих габаритів, що не дозволяє отримати коректні результати. За таких умов важко планувати рівномірне стаціонарне опромінення крупного обладнання АЕС. І вже зовсім важко за такою технологією опромінювати фізичні мішені малого розміру. Указані причини виявилась вирішальними і спонукали до пошуку іншої технології опромінювання, придатної і для зразків великих габаритів, і для фізичних мішеней перерізом близько  $1 - 2 \text{ см}^2$ .

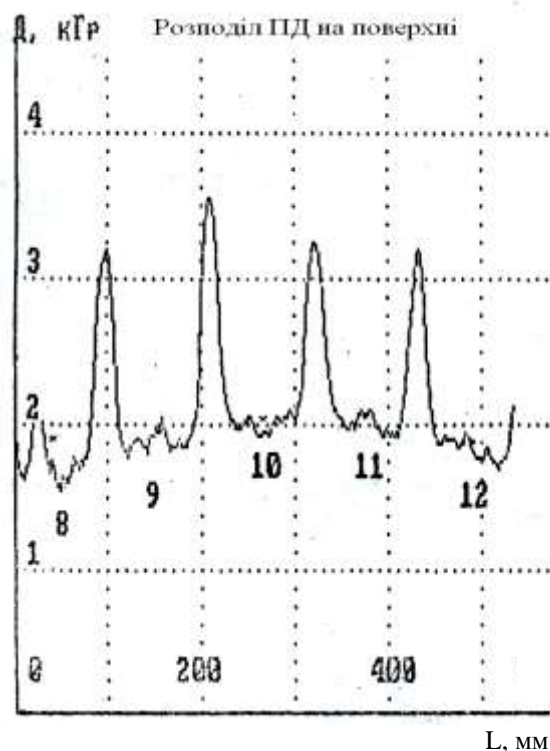


Рис. 2. Результати радіаційних досліджень габаритних промислових виробів з органічних матеріалів.

Така технологія була створена із залученням ефектів розсіювання заряджених частинок при взаємодії з матеріалами [3]. Головною вимогою до розробки такої технології була необхідність реалізації принципів «безтіньового опромінювання», коли випромінювання поступає на кожну точку об'єкта з різних напрямків [4]. Схема розробленої технології такого «безтіньового опромінювання» наведена на рис. 3 [5]. Вона складається із системи відбиваючих екранів (рефлекто-

рів) і тонких розсіювачів (рефракторів), які трансформують вузький пучок прискорених електронів у широкий потік із певним розподілом інтенсивності в площині мішені, як це показано на рис. 3. Для формування поля використовуються алюмінієві рефрактори товщиною до 1 мм. За розрахунками для середньої енергії прискорених електронів 4 MeV втрати енергії на одному рефракторі будуть не більше 10 %. На графіку зображено нерівномірність поглинутої дози в товщині зразка. Фактично це технологія формування анізотропного джерела електронів, яке найбільшою мірою відповідає потребам промислових радіаційних технологій. За такого режиму опромінення мішеней великих габаритів забезпечується формування поля з розмірами  $800 \times 800 \text{ мм}$  та з кутами падіння електронів на поверхню зразка до  $120^\circ$ .

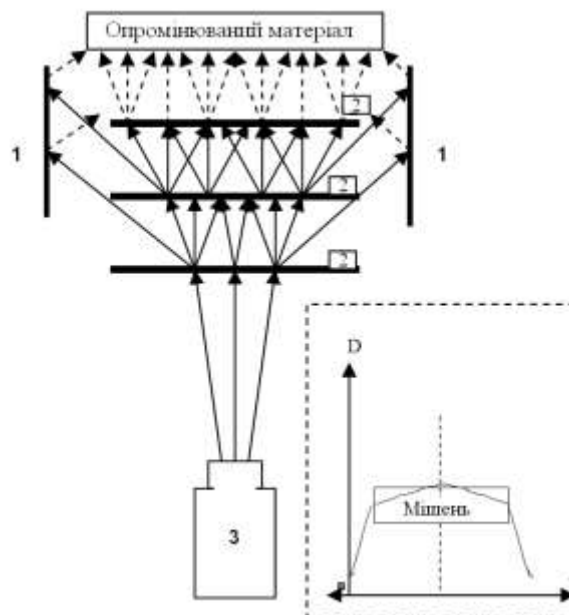


Рис. 3. Загальний принцип «безтіньового опромінювання»: 1 – рефлектор; 2 – рефрактор; 3 – лінійний прискорювач електронів.

Умовою успішного використання принципів «безтіньового опромінювання» є багатопараметрова система радіаційних вимірювань, за допомогою якої контролюється й корегується фактичний розподіл поля. Ця технологія радіаційної обробки є найбільш складною з розглянутих у даній статті. Процес здійснюється шляхом попередньої трансформації пучка з прискорювача 1 системою формування 2 у рівномірний потік на мішень 3, що контролюється за допомогою системи радіаційних вимірювань 4, 5 (рис. 4). Сигнали в системі генеруються різноманітними датчиками, які за допомогою прецизійної електро механіки переміщуються в будь-яку точку опромінюваного простору. Такий пристрій належить

до класу складної вимірювальної техніки високої точності (його кінематична схема показана в правій верхній частині рисунка). В основі пристрою лежить механічна схема з кареткою, на

якій закріплюються датчики для сканування радіаційного поля. Каретка переміщується за допомогою крокових електродвигунів у межах реакційної камери.

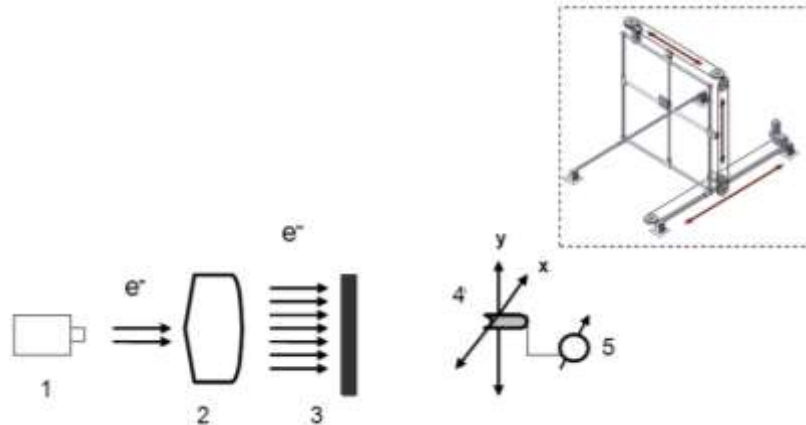


Рис. 4. Технологія радіаційної обробки зразків великих габаритів на установці ІЯД:  
 1 – лінійний прискорювач електронів; 2 – система формування;  
 3 – мішень; 4, 5 – система радіаційних вимірювань.

Досвід експлуатації такої технології показав, що вона дає змогу забезпечити рівномірне опромінення крупних об'єктів. На рис. 5 показано фактичний розподіл поглинутої дози (масштаб в см), отриманий у тих же координатах, що були наведені на рис. 2 (масштаб в мм).



Рис. 5. Фактичний розподіл поглинутої дози.

Реалізація останньої технології радіаційної обробки дала можливість різкого збільшення обсягів досліджень, у тому числі й у важливих галузях економіки (індустрії матеріалів, атомній енергетиці). Найбільш показовим є можливість застосування такої технології радіаційної оброб-

ки для потреб атомної енергетики й створити для неї сучасні методи контролю та сертифікації матеріалів та обладнання. В їхній основі – дослідження стабільності функцій обладнання в умовах дії радіації та інших несприятливих факторів, властивих ядерним енергетичним установкам [6]. Уперше в Україні на радіаційній установці ІЯД було відтворено радіаційні поля, характерні для атомних реакторів, і в об'ємах, що дає змогу випробувати там ціле комплексне обладнання АЕС. Разом з технікою для досконалих матеріалознавчих досліджень на атомному реакторі в ІЯД зараз сформована вискоєфективна сучасна технічна база для наукових та технологічних досліджень і випробувань в ядерній енергетиці.

На радіаційній установці реалізована технологія формування змішаних радіаційних полів із використанням вольфрамових конверсійних мішеней з різними коефіцієнтами затінення. Це дає можливість широкого регулювання співвідношення компонент поля та випробування критичного обладнання в його експлуатаційних умовах на АЕС.

У результаті, наприклад, у реакційній камері установки сформовано об'ємне радіаційне поле (рис. 6).

Із використанням модернізованої системи вимірювань сформовано й досліджено радіаційне поле великого перерізу. Було встановлено, що при щільності потоку первинних електронів  $10 \text{ нА/см}^2$  у центрі поля забезпечується потужність дози  $93,6 \text{ кГр/год}$ . Максимальна нерівномірність струму пучка прискорених електронів, що падають по нормалі, у межах  $800 \text{ мм}$  не перевищує  $25 \%$ .

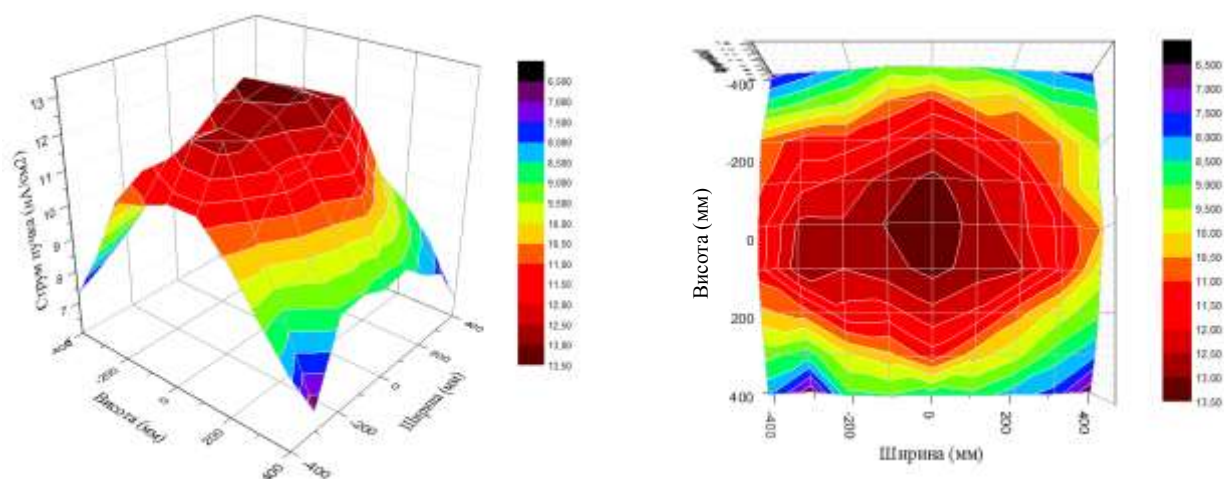


Рис. 6. Конфігурація радіаційного поля в реакційній камері установки ІЯД для функціональних випробувань обладнання АЕС. Зліва – об’ємне зображення, справа – вигляд зверху.  
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Дана конфігурація поля сформована з метою розміщення і випробування електротехнічного обладнання в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації в гермозоні енергетичних реакторів. Прикладом такого обладнання може бути електропривід типу М 76341, що використовується з арматурами систем аварійного газовидалення з першого контуру, захисту першого контуру від перевищення тиску та системи локалізуючих арматур.

### Висновки

1. Розроблено нову оригінальну методику радіаційної обробки матеріалів, яка не має аналогів у промислових технологіях. На відміну від типових методів опромінювання тонким пучком електронів шляхом його переміщення (сканування) по поверхні виробів у новому методі передбача-

ється опромінення широким ( $80 \times 80$  см) стаціонарним потоком електронів. Нова методика дала змогу більш повно використовувати технологічні переваги опромінювання зарядженими частинками й суттєво розширила можливості використання радіаційної техніки в різних галузях виробництва.

2. Уперше в практиці промислових радіаційних технологій вироби опромінюються потоками електронів із широким енергетичним спектром.

3. Створено комплекс додаткових технічних засобів для здійснення нових технологій опромінювання. Нові технічні засоби включено до складу експериментальної установки ІЯД НАН України й передано в експлуатацію.

4. Виконані розробки створили ряд нових методичних і технічних можливостей для проведення експериментальних досліджень на радіаційній установці в секторі радіаційних технологій.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Козлов Ю.Д. Разработка установок с ускорителями электронов для реализации процессов РХП. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 72 с.
2. 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.
3. Сахно В.І. Электрофизический комплекс ИЯИ НАН Украины для облучения пищевых продуктов // Сб. докл. 11-го междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. - СПб, 2005. - С. 403 - 406.
4. Сахно В.І. Створення електрофізичних радіаційних установок та дослідження змін властивостей матеріалів при промислових радіаційних технологіях: автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук / ІЯД НАН України. - К., 2009.
5. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І. та ін. Проблеми оптимізації опромінювання промислових виробів // Тези доп. XX щорічн. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. (Київ, 28 січня - 1 лютого 2013 р.). - К., 2013. - С. 114.
6. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г. Шляхи вдосконалення радіаційної техніки для кваліфікації обладнання АЕС // Ядерна фізика та енергетика. - 2013. - Т. 14, № 1. - С. 91 - 96.

**Т. В. Ковалинская, И. А. Остапенко, В. И. Сахно**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

**ТЕХНОЛОГИЯ РАВНОМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ БОЛЬШИХ ГАБАРИТОВ**

Изложены результаты исследований и разработок оптимальных методов радиационной обработки материалов и промышленных изделий больших габаритов, которые предоставили возможность в максимальной степени полно использовать технологические преимущества облучения заряженными частицами и расширили использование радиационной техники в различных отраслях современного производства и науки.

*Ключевые слова:* радиационные стенды, облучение, функциональные исследования, радиационная установка.

**T. V. Kovalinska, I. A. Ostapenko, V. I. Sakhno**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**THE TECHNOLOGY OF STEADY ELECTRON IRRADIATION  
OF LARGE SIZE INDUSTRIAL PRODUCTS**

Results of the research and development of optimal methods of irradiation processing of materials and manufactured products of large dimensions, which give the opportunity to maximize the full use of the technological advantages of irradiation with charged particles and expanded the use of radiation technology in various sectors of modern industry and science, are presented in the article.

*Keywords:* radiation stands, irradiation, functional research, radiation installation.

REFERENCES

1. *Kozlov Yu.D.* Development of facilities with electron accelerators for Radiation-chemical processes implementing. - Moskva: Energoatomizdat, 1986. - 72 p. (Rus)
2. *Sakhno V.I., Vyshnevskiy I.M., Sakhno O.V. et al.* // *Voprosy atomnoi nauki y tekhniki. Ser.: Fizika radiatsyonnykh povrezhdeniy i radiatsyonnoe materialovedenie* (91). - 2007. - No. 6. - P. 128 - 130. (Ukr)
3. *Sakhno V.I.* Electrophysics complex for food irradiation at INR of NAS of Ukraine // *Proc. of the 11th Intern. Meeting on Charged Particle Accelerators Application in industry and medicine.* - Sankt Peterburg, 2005. - P. 403 - 406. (Rus)
4. *Sakhno V.I.* Electroradiation facility creation and research of changes in the properties of materials by industrial radiation technologies: thesis abstract Dr. of Sciences in Phys. and Math. / INR NAS of Ukraine. - Kyiv, 2009. (Ukr)
5. *Kovalinska T.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I. et al.* Problems of industrial products irradiation optimization // *XX Annual Scient. Conf. of the Institute for Nuclear Research: abstracts* (Kyiv, 28 January - 1 February 2013). - Kyiv, 2013. - P. 114. (Ukr)
6. *Kovalins'ka T.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Zelins'kyi A.G.* // *Yaderna fizyka ta energetyka* (Nucl. Phys. At. Energy). - 2013. - Vol. 14, No. 1. - P. 91 - 96 (Ukr)

Надійшла 05.11.2015

Received 05.11.2015