

ОЦІНКА ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НОВИХ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ВІД ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Л. Д. Третьякова, канд. тех. наук (НТУУ «КПІ»)

Выполнены исследования материалов для защиты персонала АЭС от действия ионизирующего излучения. Рассмотрены особенности проектирования и изготовления средств коллективной и индивидуальной защиты.

Analysis of materials for protecting in-plant personnel against ionizing radiation is carried out. The peculiarities of designing and manufacturing collective and personal protective equipment are considered.

На цей час в експлуатації на чотирьох українських атомних електростанціях (АЕС) знаходяться 15 енергоблоків. Робота на АЕС вимагає особливої уваги до здоров'я людини. Основними шкідливими і небезпечними чинниками, що вимагають застосування засобів колективного та індивідуального захисту (ЗІЗ), є забруднення поверхні устаткування, приміщень і повітря пилом, аерозолями та рідкими розчинами, до складу яких входять радіоактивні речовини, та опромінення від джерел іонізуючого випромінювання (ІВ).

Основним призначенням ЗІЗ в атомній енергетиці є попередження потрапляння радіоактивних і хімічних речовин до органів дихання, травлення і на шкіру. Такі засоби виключають або зводять до мінімуму дозу опромінення [1].

До основних джерел радіаційної небезпеки на АЕС відносяться: зовнішнє іонізуюче γ , β , α -випромінювання від устаткування, приміщень, джерел ІВ; радіоактивне забруднення устаткування і приміщень; внутрішнє опромінення від радіонуклідів, що вдихуються з повітрям і поглинаються з водою.

До комплекту спецодягу персоналу, в залежності від рівня та характеру можливого радіоактивного забруднення, повинні входити основні та додаткові ЗІЗ [2]. Основний комплект і додаткові ЗІЗ призначені для захисту персоналу не від дії ІВ, а від потрапляння радіоактивних речовин у вигляді пилу, аерозолів або рідини. При проведенні ремонтних, демонтажних і аварійно-відновлювальних робіт, а також під час утилізації радіоактивних відходів на АЕС виникає необхідність перебування персоналу в зонах дії полів ІВ з енергіями в інтервалі від 0,1 до 2 МеВ.

Зараз для виготовлення екранів та додаткових ЗІЗ, призначених для захисту від ІВ, використовуються гумові матеріали, що містять свинець. Свинцева гума виробляється з щільністю $\rho = 3,3 \dots 5,8 \text{ г/см}^3$. За своїми захисними властивостями свинцева гума товщиною 3 мм ($\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$) еквівалентна 1 мм свинцю. Гума має малий час старіння, при експлуатації і дезактивації виникають тріщини, що призводить до втрати захисних властивостей.

Метою роботи є оцінка основних захисних властивостей і характеристик ЗІЗ, призначених для захисту від зовнішнього ІВ. Основними задачами

дослідження є вибір матеріалу з відповідними захисними властивостями і розроблення базових конструкцій ЗІЗ. Захисний одяг повинен відповідати таким вимогам:

- виготовлятися з матеріалів, що добре дезактивуються;
- мати мінімальну кількість швів, клапанів, застібок, кишень, які накопичують радіоактивні речовини і утруднюють дезактивацію всього виробу;
- забезпечувати легкість в одяганні та зніманні з мінімальним ризиком забруднення;
- забезпечувати нормальну терморегуляцію організму;
- бути зручним, не створювати надмірного статичного навантаження на тіло, не обмежувати рухів працівника;
- відповідати естетичним та гігієнічним вимогам.

Радіаційний захист забезпечується трьома способами – захист часом, відстанню і екрануванням.

Захист відстанню полягає в тому, що вплив ІВ на організм зменшується зі збільшенням відстані від джерела випромінювання. Персонал станції повинен знаходитися на певній відстані від джерела випромінювання (потужність дози зі збільшенням відстані від джерела знижується у квадратичній залежності):

$$R = \sqrt{A\Gamma/P_{\text{дпд}}} , \quad (1)$$

де R – відстань від джерела випромінювання до об'єкта опромінення, см; A – активність нукліда у джерелі, мКі; Γ – гамма-постійна нукліда, мР/год; $P_{\text{дпд}}$ – допустима потужність дози, мР/год;

$$P_{\text{дпд}} = \text{ЛД} / t , \quad (2)$$

де ЛД – ліміт дози, мЗв/год; t – час опромінення, год.

Ліміт сумарного внутрішнього і зовнішнього опромінення для персоналу категорії А становить 20 мЗв/рік [2].

Захист часом полягає в тому, що вплив ІВ на організм зменшується зі зменшенням часу опромінення. Чим менше часу працівник перебуває в полі випромінювання, тим меншу дозу він отримує. Час опромінення, не пов'язаний з безпосереднім виконанням роботи, необхідно скорочувати до мінімуму. Якщо персонал працює на певній відстані R від джерела гамма-випромінювання, то граничний час роботи визначається за формулою

$$t_{\text{г}} = \sqrt{D_{\text{ггд}} R^2 A \Gamma} , \quad (3)$$

де $D_{\text{ггд}}$ – гранична тижнева доза опромінення, яка дорівнює 38 мР; $t_{\text{г}}$ – граничний час роботи протягом тижня, год.

Захист екрануванням досягається застосуванням колективних та індивідуальних систем захисту персоналу.

Спираючись на світовий досвід, матеріали для захисного одягу створюють на основі полімерних матеріалів – полівінілхлориду (ПВХ), поліпропілену та поліуретану, але не на основі гуми [3]. Відповідно до чинних європейських

стандартів в одязі не повинні використовуватися матеріали зі свинцевими наповнювачами.

При проектуванні засобів захисту було вибрано матеріал «Протектор-2000» (ПВХ-РЗО) вітчизняного виробництва [3], який являє собою полімерну композицію на основі ПВХ з високим вмістом багатоеlementної суміші дрібнодисперсного наповнювача з оксидів рідкоземельних елементів. Матеріал випускається у вигляді еластичної плівки товщиною 0,55...0,58 мм і щільністю 2,2...2,3 г/см³. У його складі відсутній свинець. На відміну від подібних матеріалів на основі гуми «Протектор-2000» добре піддається вторинній переробці, що дозволяє практично без відходів утилізувати захисний одяг після закінчення строку експлуатації. Було розроблено також комбінований матеріал типу ПВХ-РЗО+Ф, який містить шари алюмінієвої фольги.

Один шар матеріалу «Протектор-2000» забезпечує практично повний захист від α -частинок з енергіями 4...10 МеВ. Для ослаблення щільності потоку β -частинок потрібно від одного до чотирьох шарів матеріалу в залежності від енергії потоку.

Захисні властивості матеріалів при дії γ -випромінювання досліджувались експериментально на промплощадці Південноукраїнської АЕС.

Відомо, що потужність дози випромінювання I_d , ослабленої однорідним захисним шаром товщиною d , в геометрії вузького пучка для плоского мононаправленого джерела можна записати у вигляді [1]

$$I_d = I_0 e^{-\mu d}, \quad (4)$$

де I_0 – потужність експозиційної дози джерела при $d = 0$, мР/год; μ – лінійний коефіцієнт ослаблення, см⁻¹; d – товщина захисного шару, см.

Визначення залежності лінійного коефіцієнта ослаблення від товщини захисного шару виконувалось з використанням калібрувального приладу СРП-68-1 з джерелом ⁶⁰Со та приладом ДРГ-1Т1 для контрольних вимірів за схемою, представленою на рис. 1.



Рис. 1. Схема розташування зразка захисного матеріалу: 1 – прилад СРП-68-1; 2 – зразок захисного матеріалу; 3 – прилад ДРГ-1Т1

Між приладом з джерелом випромінювання 1 і вимірювальним приладом 3 впритул розташовувався захисний шар 2, товщина d якого варіювалась. Щільність матеріалів ПВХ-РЗО та ПВХ-РЗО+Ф була вибрана однаковою.

Лінійний коефіцієнт ослаблення визначає частку випромінювання, яке поглинається захисним шаром. При обробці результатів вимірювань лінійний коефіцієнт ослаблення визначався за формулою [6]

$$\mu = M[\mu] \pm k\sigma_\mu, \quad (5)$$

де $M[\mu]$ – середнє значення лінійного коефіцієнта ослаблення, см^{-1} ; σ_μ – середнє квадратичне відхилення; k – розрахунковий коефіцієнт, який визначається за формулою (10)

$$M_\mu = \frac{1}{d} \ln \frac{M[I_d - I_f]}{M[I_0 - I_f]}, \quad (6)$$

де I_f – потужність експозиційної дози, обумовлена природним фоном, мР/год; I_d – потужність експозиційної дози після захисного шару, мР/год.

При проведенні експерименту потужність дози природного фону I_f становила 0,015...0,02.

Сумарна дисперсія результатів вимірів D_Σ визначається як сума дисперсій вимірів потужностей експозиційної дози джерела D_0 , природного фону D_f , після захисного шару D_d :

$$D_\Sigma = D_0 + D_d + D_f. \quad (7)$$

Технологія виготовлення матеріалу обумовлює систематичну похибку D_s через нерівномірність товщини захисного шару $\theta = 0,1$.

$$D_s = k_1 \theta_1^2, \quad (8)$$

де k_1 – коефіцієнт, який враховує систематичну похибку вимірювального пристрою, $k_1 = 1,1$.

Середнє квадратичне відхилення та розрахунковий коефіцієнт k визначаються за формулою

$$\sigma_\mu = \sqrt{D_\Sigma^2 + D_s^2}; \quad (9)$$

$$k = \frac{k_2 \sqrt{D_\Sigma} + k_1 \sqrt{D_s}}{\sqrt{D_\Sigma} + \theta_1 \sqrt{D_s}}, \quad (10)$$

де k_2 – коефіцієнт, який залежить від співвідношення імовірної та системної похибки. З імовірністю 0,95 і нормальним розподілом похибки $k_2 = 1,96$.

На рис. 2 показано зміни потужності дози при проходженні потоку випромінювання через захисний матеріал.

Залежності, зображені на рис. 2, апроксимовані виразами за методом найменших квадратів [6]:

для матеріалу ПВХ-РЗО:

$$I(d) = 0,1221 \times \exp(-0,5223 \times d) \text{ при коефіцієнті кореляції } r = 0,98;$$

для матеріалу ПВХ-РЗО+Ф:

$$I(d) = 0,1221 \times \exp(-0,6578 \times d) \text{ при коефіцієнті кореляції } r = 0,96.$$

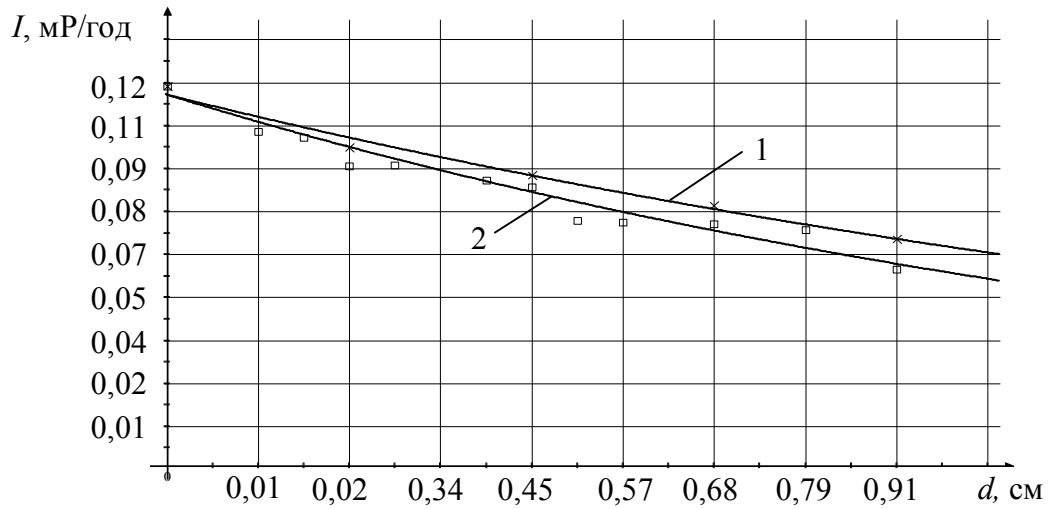


Рис. 2. Залежність потужності експозиційної дози від товщини і типу захисного матеріалу: 1 – для матеріалу ПВХ-РЗО; 2 – для матеріалу ПВХ-РЗО+Ф

Таким чином, лінійний коефіцієнт ослаблення для матеріалу ПВХ-РЗО дорівнює $0,52 \text{ см}^{-1}$, для матеріалу ПВХ-РЗО+Ф – $0,66 \text{ см}^{-1}$.

При практичних розрахунках для визначення товщини захисного матеріалу d для ослаблення γ -випромінювання в K разів з урахуванням значення лінійного коефіцієнта ослаблення μ використовують залежність [1]

$$d = \ln K / \mu; \quad (11)$$

$$K = I_0 / I_d. \quad (12)$$

На рис. 3 наведено залежність коефіцієнта ослаблення K від товщини захисного шару d .

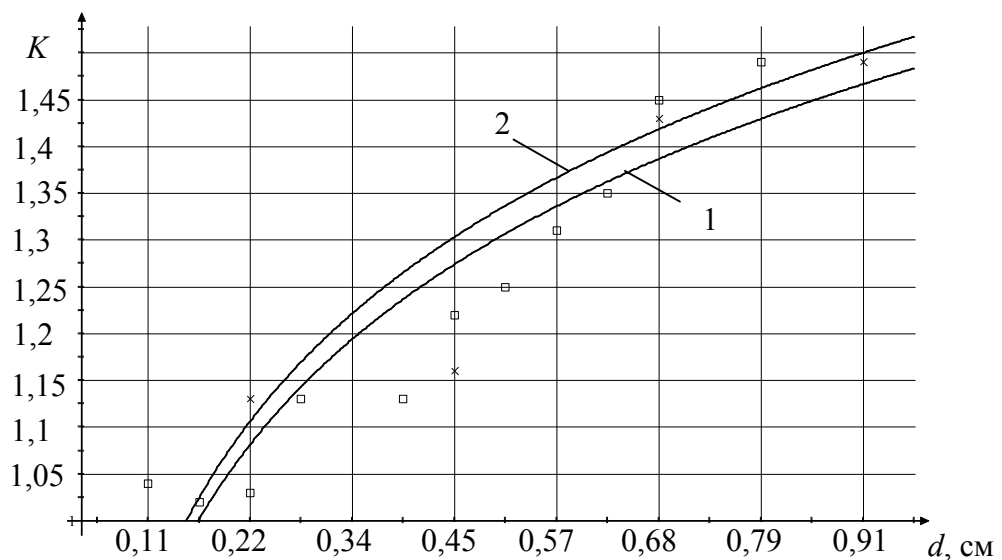


Рис. 3. Залежність коефіцієнта ослаблення K від товщини і типу захисного шару: 1 – для матеріалу ПВХ-РЗО; 2 – для матеріалу ПВХ-РЗО+Ф

Залежності, зображені на рис. 3, апроксимовані виразами:

для матеріалу ПВХ-РЗО:

$$K(d) = 0,2878 \times \ln(d) + 1,4925 \text{ при коефіцієнті кореляції } r = 0,91;$$

для матеріалу ПВХ-РЗО+Ф:

$$K(d) = 0,2839 \times \ln(d) + 1,5265 \text{ при коефіцієнті кореляції } r = 0,91.$$

Таким чином, встановлено залежність коефіцієнта ослаблення γ -випромінювання від товщини захисного матеріалу. Це дозволило розробити захисні засоби відповідної товщини.

За результатами досліджень для виготовлення колективних засобів захисту у вигляді екранів було вибрано матеріал ПВХ-РЗО+Ф, для виготовлення захисного одягу – матеріал ПВХ-РЗО. Було розроблено також конструкцію ЗІЗ. Розглядались такі варіанти конструкції ЗІЗ:

багат шаровий «суцільний» ЗІЗ, що забезпечує однаковий коефіцієнт ослаблення ІВ на всіх його ділянках ($K = \text{const}$);

багат шаровий ЗІЗ, з можливістю змінення коефіцієнта ослаблення.

Засоби захисту сконструйовані з двох матеріалів: поверхневий шар виготовляється з ПВХ-пластикату, який забезпечує захист від проникнення радіоактивного пилу і рідини [5]; внутрішній шар виготовляється з захисних матеріалів ПВХ-РЗО або ПВХ-РЗО+Ф відповідної товщини. Захисні екрани виготовляються прямокутної форми і складаються з 16 захисних шарів, що забезпечує половинне ослаблення γ -випромінювання.

ЗІЗ спроектовані за модульним типом і складаються з основи, що виготовляється з ПВХ-пластикату, та модулів з захисного матеріалу різної товщини. Така конструкція ЗІЗ дозволяє не тільки змінювати коефіцієнт ослаблення у відповідності до коефіцієнта радіаційного ризику різних органів людини, але й раціонально використовувати матеріал і контролювати вагу готового виробу.

Радіаційно-захисний костюм (рис. 4) складається з жилета 1 (захист критичних органів тулуба, включаючи гонади та пахову область), знімного коміра з плечовими накладками 2 (захист щитовидної залози, кісткового мозку в області шиї, плечової частини), рукавів 3 (захист суглобів) та захисних модулів 4.

Базова модель захисного костюма має такі характеристики:

коефіцієнт ослаблення зовнішнього γ -випромінювання з енергією до 150 кеВ – не менше 1,3;

практично абсолютний захист від β -випромінювання з енергією до 2 МеВ; маса – до 16 кг.

Засоби захисту виготовляються з використанням методу зварювання струмами високої частоти. На цей час виготовлені експериментальні зразки, які пройшли випробування у промислових умовах Південноукраїнської та Запорізької АЕС.

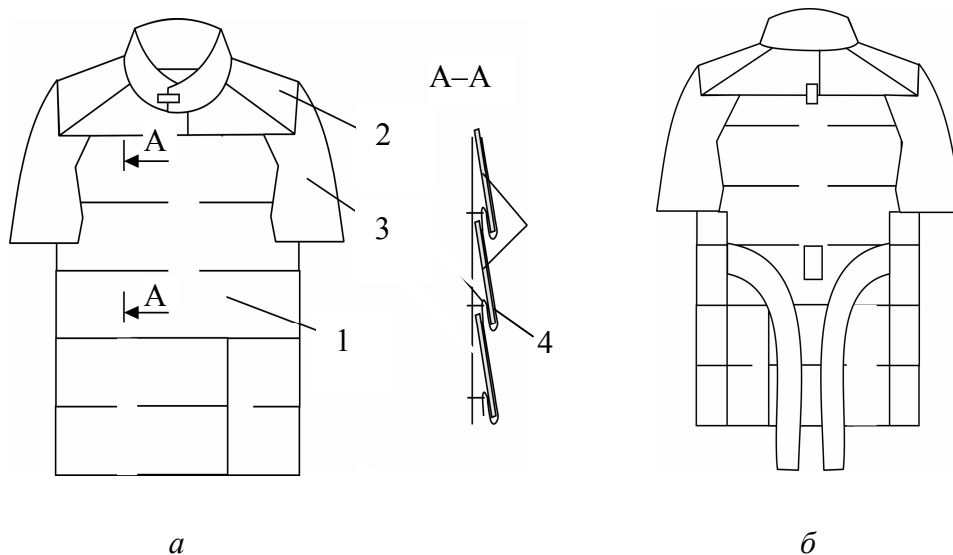


Рис. 4. Загальний вигляд захисного костюма: *а* – спереду; *б* – ззаду

Висновки

1. Розроблено конструкцію захисних засобів для забезпечення ефективного захисту персоналу АЕС при проведенні ремонтних, аварійних та післяаварійних робіт у полях зовнішнього іонізуючого випромінювання.
2. Обґрунтовано вибір матеріалів колективних захисних засобів і ЗІЗ, які забезпечують відповідні захисні та фізико-механічні характеристики.
3. Запропонована конструкція ЗІЗ відповідає вимогам державних стандартів України, забезпечує ефективний захист органів людини і має високу ступінь надійності. У захисному одязі не використовуються свинцевмісні матеріали. Костюм не обмежує свободу рухів персоналу при проведенні робіт.
4. Використання розроблених засобів захисту дозволяє збільшити час перебування персоналу в зоні дії ІВ.

1. *Защита от ионизирующих излучений* / Н. Г. Гусев, В. А. Климанов, В. П. Машкович, А. П. Суворов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
2. *Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України*. – МОЗ України. – 2005. – 40 с.
3. *Пишинів В. М.* Порівняльна оцінка рентгенозахисних матеріалів на основі свинцевмісних і безсвинцевих наповнювачів // Український радіологічний журнал. – 2002. – Т. 10. – Вип. 1. – С. 24–28.
4. *ДСТУ ISO 8194-2004*. Одяг для захисту від радіоактивного випромінювання і забруднення. – 2004. – 24 с.
5. *Третякова Л. Д., Селіверстов А. Є., Литвиненко Г. Є.* Розробка засобів індивідуального захисту для працівників об'єктів ядерної енергетики // Вісник ННДІОП. – 2004. – Вип. 7. – С. 1–3.
6. *Вентцель В. С., Овчаров Л. А.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1989. – 363 с.