

УДК 687.174:621.039

Л. Д. Третякова, д.т.н., проф. (НТУУ «КПІ»), І. М. Подобед, к.т.н. (ДУ «ННДІПБОП»)

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ВІД ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

L. D. Tretiakova (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»), I. M. Podobed (DU «NNDIPBOP»)

### THE TESTED AND MEASURED COEFFICIENTS OF THE PROTECTIVE MATERIALS TO KEEP FROM HARM OF THE IONIZING RADIATION

*У статті викладено результати лабораторних випробувань нових матеріалів, призначених для виготовлення засобів індивідуального захисту для працівників атомних електричних станцій, які обмежують вплив зовнішніх іонізуючих випромінювань. Експериментально встановлено, що запропоновані матеріали мають захисні властивості від  $\alpha$ -,  $\beta$ -випромінювань. Визначено коефіцієнти захисту і встановлено їхні параметричні залежності від кількості шарів матеріалу.*

**Ключові слова:** атомні електричні станції, захисний одяг, іонізуючі випромінювання, коефіцієнти захисту матеріалів.

*The article presents the results of laboratory tests of the developed materials, used for the manufacture of permeable protective clothing, which has characteristics to limit the impact of external ionizing radiation. It has been experimentally proved that these materials have the properties to protect from  $\alpha$ -,  $\beta$ -ionizing radiation. The coefficients of protection were determined and their parametric dependence on the number of material layers was defined.*

**Keywords:** nuclear power plant, personal protective clothing, ionizing radiation, coefficients of the protective materials.

*В статье изложены результаты лабораторных испытаний новых материалов, предназначенных для изготовления средств индивидуальной защиты, которые ограничивают влияние внешних ионизирующих излучений на работников атомных электрических станций. Экспериментально установлено, что предложенные материалы имеют защитные свойства от  $\alpha$ -,  $\beta$ -излучений. Определены коэффициенты защиты и установлены их параметрические зависимости от количества слоев материала.*

**Ключевые слова:** электрические атомные станции, защитная одежда, ионизирующие излучения, коэффициенты защиты материалов.

**Вступ.** Працівники атомних електричних станцій (АЕС) виконують важливі функції щодо безперебійного та безаварійного функціонування енергооб'єкта. АЕС віднесено до радіаційнонебезпечних промислових об'єктів, що зумовлено можливістю виникнення ризиків опромінювання працівників і забрудненням радіонуклідами прилеглих територій. Такі ризики у практичній діяльності зумовлено недосконалістю устаткування на АЕС України, а також

виникають в аварійних ситуаціях через помилкові дії персоналу чи відмови в устаткуванні через вичерпання ним гарантованого терміну експлуатації [1].

Особливістю умов праці на АЕС є комплексний вплив небезпечних і шкідливих виробничих чинників (НШВЧ), включно з  $\alpha$  і  $\beta$ - випромінюваннями [2]. Обмеження негативного впливу на працівників зовнішніх іонізуючих випромінювань, спричинених недосконалістю наявних техніко-організаційних заходів, досягають завдяки використанню комплектів засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Це потребує розроблення нових ЗІЗ, особливо таких, які обмежують вплив на працівника комплексу НШВЧ, не створюючи додаткових ризиків в експлуатації.

**Аналіз сучасного стану питання.** Аналізуючи наявний стан національної і міжнародної нормативних баз з радіаційної безпеки, загальні нормативні акти з контролю граничнодопустимих рівнів опромінювання [3] треба відзначити, що обмежується еквівалент індивідуальної дози, який є інтегральним показником впливу усіх видів зовнішнього іонізуючого опромінювання на працівника. Величина дози контролюється на глибині (0,07...10) мм в м'якій тканині тіла людини: 0,07 мм за умови опромінювання поверхні шкіри; 10 мм – для оцінки дози, набутої інгаляційним або пероральним способом. Діючі в Україні нормативні документи з радіаційної безпеки обмежують рівень ефективної дози професійного опромінювання працівника на рівні 20 мЗв за рік, усередненої за п'ять послідовних років.

На діючих АЕС залежно від розташування основного енергетичного устаткування і величини радіаційного впливу, приміщення поділяють на А, Б, В групи [4]. Основні шкідливі фактори в приміщеннях категорії А – постійний вплив  $\beta$ -активних аерозольних забруднень високої концентрації (до  $10^8$  Ки/дм<sup>3</sup>), зовнішнє іонізуюче випромінювання, рідкі радіоактивні речовини. У приміщеннях категорії Б забруднення містять  $\beta$ -активні аерозолі і місцеві розливи рідких радіоактивних речовин. У приміщеннях категорії В можливий вплив  $\beta$ -активних аерозолів малої концентрації. Найбільшу небезпеку становлять ремонтні роботи, які здійснюють під час розкриття закритих зон (гермозони) та всередині реактора. Ці ділянки характеризуються підвищеним  $\gamma$ -фоном та осколковим забрудненням з  $\beta$ -частинками. В аварійних ситуаціях фіксують додатково вплив  $\alpha$ -випромінювань. Так, з аналізу умов праці на Південноукраїнській АЕС випливає, що постійно опромінюванню піддаються 43% працівників (серед них жінки – 18 %), а підвищений рівень опромінювання має 1,51 % працівників. На Запорізькій АЕС відповідно 20 % і 0,05 % працівників.

Особливістю формування нешкідливих параметрів виробничого середовища для працівників АЕС є необхідність дотримання вимог декількох санітарних норм і правил: загальних, які стосуються обмеження низки хімічних (кислоти, луги, розчинники, зварювальні аерозолі, пил), фізичних (механічні навантаження, шум, вібрації, статична електрика, інфрачервоне, електромагнітне, теплове випромінювання) і біологічних НШВЧ; спеціальних, щодо обмеження радіаційного впливу. Досліджено умови праці різних

категорій працівників АЕС [5] і визначено, що основні експлуатаційні заходи та обмеження, які можливо здійснювати для зниження рівня опромінення працівників, недостатні для адекватного обмеження індивідуальних доз опромінювання. Нині основний захист працівників забезпечують через використання комплектів ЗІЗ, до складу яких входять певні види захисного одягу, ЗІЗ ніг, рук та органів дихання.

**Мета роботи.** Експериментально-розрахункова оцінка захисних властивостей від  $\alpha$ - і  $\beta$ -випромінювань нових видів матеріалів, призначених до розробки ЗІЗ для працівників АЕС. Об'єкт досліджень – процес забезпечення радіаційної безпеки працівників АЕС.

**Методи дослідження.** В основу досліджень покладено експериментальні випробування, виконані за методиками, наведеними у відповідних державних стандартах. Аналіз отриманих результатів здійснено за методами регресійного аналізу.

**Результати досліджень.** Конструкторсько-технологічну розробку ЗІЗ здійснюють із застосуванням матеріалів, перевірених у дослідних і промислових умовах. Сучасна світова тенденція передбачає, що розробленню певного захисного засобу передують створення окремого матеріалу з відповідними параметрами. Розроблено склад і технологію отримання полівінілхлорид (ПВХ) пластикату та матеріалу з композиційним покриттям (МП), які призначено до виготовлення ізолювального негерметичного комплексу. Для фільтрувального захисного комплексу вибрано композиційні текстильні матеріали на основі вуглецевих волокон (КТМ) фірми «KÄRCHER» [6]. Такі матеріали багатофункціональні, з відповідними захисними, гігієнічними та фізико-механічними характеристиками, більш адаптовані до людини і довкілля, мають невисоку ціну.

Оцінку захисних властивостей матеріалів від  $\alpha$ -,  $\beta$ -випромінювання здійснено під час випробувань у лабораторії Південноукраїнської АЕС відповідно до вимог стандарту [7]. Для вимірювань використано установку, яка містить радіометр і камеру, до якої вкладають найпоширеніші ізотопи (плутоній  $^{239}\text{Pu}$ , цезій  $^{137}\text{Cs}$ , стронцій  $^{90}\text{Sr}$  та ітрій  $^{90}\text{Y}$  з активністю  $10^5 \dots 10^7$  Бк). Радіометр, який використано, має змогу вимірювати щільність потоку частинок у діапазоні  $(10 \dots 10^5)$  част./ $(\text{см}^2 \text{ хв})$  з похибкою не більш як 10 %.

Відомо, що ослаблення щільності частинок досягають через збільшення товщини захисного матеріалу або його шарів. Технологія виготовлення матеріалів не забезпечує фіксованого значення товщини: у ПВХ-пластикатах вона змінюється в межах 0,12...0,15 мм; МП – 0,3...0,36 мм; КТМ – 1,36...1,44 мм. Матеріали з площею активної поверхні 8...10  $\text{см}^2$  піддавали впливу частинок і рівень поглинання кожним шаром матеріалу визначався за щільністю частинок  $J$ , які фіксувалися радіометром: початкова –  $J_0$ ; за кожним  $N$  шаром  $J_N$  матеріалу (табл. 1). Випробування здійснено п'ятиразово для кожного шару матеріалу і до розрахунків прийнято мінімальне значення з отриманих.

Таблиця 1. Характеристика захисної здатності матеріалів з ПВХ-пластикату

Вид ізотопу	Початковий рівень $J_{o_2}$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Пропускна здатність матеріалу, імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )					
			Один шар $J_1$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Два шари $J_2$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Три шари $J_3$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )	
	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.
$^{239}\text{Pu}$	606	1131	0,10	100	0	0,6	0	0
$^{137}\text{Ce}$	308	14171	105	6118	52	3316	2	10
$^{90}\text{Sr}, ^{90}\text{Y}$	58	2521	14	972	8,7	520	0,8	18

Аналогічні випробування здійснено для матеріалу МП і КТМ (табл. 2, 3).

Таблиця 2. Характеристика захисної здатності матеріалу МП

Вид ізотопу	Початковий рівень $J_{o_2}$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Пропускна здатність матеріалу, імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )					
			Один шар $J_o$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Два шари $J_o$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Три шари $J_3$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )	
	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.
$^{239}\text{Pu}$	606	1131	0,10	0,8	0	0,5	0	0
$^{137}\text{Ce}$	308	14171	236	11181	170	9196	26	1000
$^{90}\text{Sr}, ^{90}\text{Y}$	58	2521	38	1925	28	1554	18	1320

Таблиця 3. Характеристика захисної здатності матеріалу КТМ

Вид ізотопу	Початковий рівень $J_{o_2}$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Пропускна здатність матеріалу, імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )					
			Один шар $J_1$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Два шари $J_2$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )		Три шари $J_3$ , імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ )	
	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.	$\alpha$ -част.	$\beta$ -част.
$^{239}\text{Pu}$	606	1131	1,3	3,2	0,80	2,5	0	1,0
$^{137}\text{Ce}$	308	14171	220	10417	149	7964	82	5300
$^{90}\text{Sr}, ^{90}\text{Y}$	58	2521	31,5	1726	22,3	11280	0,8	588

У [7] запропоновано визначати захисні властивості матеріалів за величиною коефіцієнта захисту  $K_3$  і розраховувати його за формулою:

$$K_3 = \frac{J_s - J_f}{J_d - J_f}, \text{ де:} \quad (1)$$

$J_s$ ,  $J_f$ ,  $J_d$  – відповідно щільність потоку частинок джерела, фонова і за шаром матеріалу завтовшки  $d$ .

Треба відзначити, що (1) містить суттєві вади, а саме: є невизначеною у разі, якщо через шар матеріалу не проходить жоден імпульс; буде мати від'ємне значення за наявності щільності, зумовленою високим природним фоном; не враховує дискретні зміни товщини матеріалу, які спричинено технологією виготовлення; має великий діапазон значень, що збільшує зону невизначеності та ускладнює подальшу математичну обробку результатів. Тому запропоновано коефіцієнти захисту матеріалу від  $\alpha$ - і  $\beta$ - випромінювань  $K_{3\alpha}$ ,  $K_{3\beta}$  розраховувати за формулою:

$$K_{3\beta} = K_{3\alpha} = \left( 1 - \frac{J_N - J_f}{J_0 - J_f} \right), \text{ де:} \quad (2)$$

$J_0$ ,  $J_N$ , – відповідно початкова щільність потоку частинок джерела і за кожним  $N$ -ним шаром матеріалу. Фонова щільність потоку частинок джерела у випробувальній установці становила: для  $\alpha$ -частинок – 0,01 імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ ), для  $\beta$ -частинок – 0,201 імп./( $\text{с}\cdot\text{см}^2$ ).

Відповідно до (2) коефіцієнти захисту змінюються від 0 до 1, мають завжди позитивні значення, що дає можливість визначити потрібну кількість шарів конструкції захисного одягу і у такий спосіб забезпечити максимально можливий рівень захисту від зовнішнього іонізуючого випромінювання.

Згідно з [7], виробам після випробувань надають відповідний клас захисту. Використання (2) дає змогу зменшити зону невизначеності коефіцієнтів захисту ЗІЗ (табл. 4).

Таблиця 4. Класифікація захисного одягу за захисними властивостями

Класифікація ЗІЗ	Коефіцієнт захисту за (1)	Коефіцієнт захисту за (2)
Перший клас	3...10	0,660...0,900
Другий клас	11...30	0,901...0,966
Третій клас	31...100	0,967...0,990
Четвертий клас	Більш як 100	0,991...1,0

Технічне завдання з проектної розробки захисного одягу завжди передбачає необхідність досягнення повного виключення впливу на працівника НШВЧ, до яких безумовно належать іонізуючі випромінювання. У конструкторсько-технологічній розробці збільшення коефіцієнту захисту досягають через збільшення шарів матеріалу на окремих ділянках або всієї конструкції ЗІЗ [8]. Враховуючи, що товщина матеріалу є змінною характеристикою, яка залежить від виду матеріалу, технології виготовлення, виду устаткування, для конструкторської розробки запропоновано аналітичні залежності коефіцієнтів захисту від кількості шарів  $N$  матеріалу. За регресійного аналізу досліджено залежності коефіцієнтів захисту  $K_{3\alpha}$ ,  $K_{3\beta}$  для визначених матеріалів та отримано такі лінійні апроксимації (з коефіцієнтом кореляції 0,94...0,96):

1. ПВХ-пластикат завтовшки 0,12...0,15 мм;

$$K_{3\alpha} = 0,121N + 0,575; K_{3\beta} = 0,153N + 0,451.$$

2. Матеріал з покриттям завтовшки 0,30...0,36 мм;

$$K_{3\alpha} = 0,259N + 0,056; K_{3\beta} = 0,148N + 0,061.$$

3. Композиційний матеріал завтовшки 1,36...1,44 мм;

$$K_{3\alpha} = 0,224N + 0,065; K_{3\beta} = 0,182N + 0,082.$$

У ході виконання робіт працівники можуть піддаватися потоку  $\alpha$ -і  $\beta$ -частинок різної щільності та енергії, тому регресійні залежності вибрано з коефіцієнтами, які забезпечують найповільніше досягнення максимального значення коефіцієнту захисту.

Проаналізувавши отримані залежності, можна констатувати, що найкращі захисні властивості від впливу  $\alpha$  і  $\beta$ -випромінювань має матеріал ПВХ-пластикат, який забезпечує практично повний захист за тришарової конструкції ЗІЗ. КТМ за тришарової конструкції може забезпечити коефіцієнт захисту від  $\alpha$ -випромінювань на рівні 0,74...0,83 та від  $\beta$ -випромінювань – 0,63...0,77, МП відповідно від  $\alpha$ -випромінювань – 0,86...0,92, від  $\beta$ -випромінювань – 0,48...0,51.

Отримані залежності дають можливість оцінити захисні властивості ЗІЗ і вибрати способи їх підвищення у ході проектної розробки.

### Висновки

1. Обмеження впливу на працівників АЕС зовнішнього іонізуючого випромінювання можна реалізувати через використання відповідних комплектів засобів індивідуального захисту.

2. Для виготовлення негерметичних захисних комплектів розроблено новітні матеріали: композиційні текстильні, з полівінілхлоридним покриттям і полівінілхлорид пластикат. Експериментально встановлено, що запропоновані матеріали мають захисні властивості від  $\alpha$ -,  $\beta$ -випромінювань. Визначено коефіцієнти захисту і встановлено їх параметричні залежності від кількості шарів матеріалу.

3. Запропоновано нову формулу для визначення коефіцієнту захисту, яка порівняно з наявною, зменшує інтервал невизначеності, враховує дискретні зміни товщини матеріалів і дає можливість формалізувати процес конструкторсько-технологічної розробки засобів індивідуального захисту.

### Список використаних джерел

1. Здановский В.Г. Аспекты промышленной и радиационной безопасности атомных электростанций. / В.Г. Здановский // Проблемы охорони праці в Україні: зб.наук.праць. – 2013. – Вип. 26. – С. 24–32.

2. Соботович Е. Ядерна енергетика і наслідки чорнобильської катастрофи. / Е. Соботович, Р. Белевцев // Вісник НАН України. – 2009. – № 4 – С. 29–39.

3. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения // МАГАТЭ. Серия норм по безопасности. – 1997. – № 115. – 156 с.
4. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України. – МОЗ України. – 2005. – 40 с.
5. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation // ICRP, ICRU. Tech. Rep. Ser. – 1997, No. 74. – 48 p.
6. Риск-ориентированные подходы оптимизации технического обслуживания и эксплуатационного контроля систем, важных для безопасности АЭС / Под. ред. В.И. Скалазубова. – Одесса: ТЭС, 2004. – 530 с.
7. Селіверстов А.Є. Розробка засобів індивідуального захисту для працівників об'єктів ядерної енергетики / А.Є. Селіверстов, Г.Є. Литвиненко, Л.Д. Третякова // Вісник національного науково-дослідного інституту охорони праці. – 2004. – № 7. – С. 1–3.
8. Третякова Л.Д. Дослідження фізико-механічних характеристик нових полімерних матеріалів для захисного одягу / Л.Д. Третякова // Проблеми охорони праці в Україні. – 2007. – Вип. 14. – С. 59–67.
9. ГОСТ 12.4.217-2001. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от радиоактивных веществ и ионизирующих излучений. Требования и методы испытаний. – www/OpenGost.ru, 2003. – 19 с.
10. Третякова Л.Д. Оптимізація заходів підвищення ефективності радіаційнозахисного одягу / Л.Д. Третякова // Проблеми охорони праці в Україні: зб. наук. праць. – 2012. – Вип. 22. – С. 116–123.

*Стаття надійшла до редакції 04.11.2014 р.*