

В.М. Пишнєв

Державне конструкторське
бюро «Південне»
ім. М.К. Янгеля,
м. Дніпропетровськ

Порівняльна оцінка рентгенозахисних матеріалів на основі свинцевмісних і безсвинцевих наповнювачів

Comparative estimation of x-ray protective
materials based on lead and nonlead fillers

Цель работы: Количественное сравнение рентгенозащитных характеристик композиционных материалов со свинцовым и бессвинцовыми наполнителями, применяемых для изготовления медицинских рентгенозащитных изделий.

Материалы и методы: С использованием образцов материалов, рентгеновской и дозиметрической аппаратуры протестирована методика расчета коэффициентов ослабления рентгеновского излучения. Для трех материалов с разными типами наполнителей рассчитаны значения коэффициентов ослабления в зависимости от напряжения на рентгеновской трубке в диапазоне 30–150 кВ. В качестве наполнителей рассматривались свинец, смесь оксидов редкоземельных элементов и смесь карбида вольфрама с диоксидом циркония. Построены графики зависимости коэффициента ослабления и свинцового эквивалента от напряжения на трубке.

Результаты: Распределение в порядке уменьшения защитных свойств среди рассмотренных материалов зависит от напряжения на рентгеновской трубке. Коэффициент ослабления материалов резко падает при повышении напряжения. Простое сравнение разных материалов возможно только на непересекающихся участках зависимостей удельного коэффициента ослабления от напряжения. С учетом вторичного излучения применение средств защиты с коэффициентом ослабления в низкоэнергетической области более $\sim 10^3$ технически нецелесообразно. Сравнивая свойства материалов с разными типами наполнителей с целью выбора материала для защитных изделий, следует учитывать их функциональность.

Выводы: Значимым показателем для сравнения рентгенозащитных материалов разных типов является зависимость удельного коэффициента ослабления от анодного напряжения на рентгеновской трубке. Необходимым условием пригодности материала для средств защиты является монотонность графика этой зависимости в диапазоне рабочих напряжений. Заданный свинцовый эквивалент малоинформативен применительно к бессвинцовым материалам.

Ключевые слова: рентгенозащитные композиционные материалы, бессвинцовые наполнители, удельный коэффициент ослабления, свинцовый эквивалент.

Objective: Quantitative comparison of x-ray protective characteristics for composite materials based on lead and nonlead fillers that are used for medical x-ray protective articles manufacturing.

Material and Methods: Procedure for computation of x-ray attenuation coefficients was tested with the use of the material samples, x-ray and dosimetric equipment. Then attenuation coefficient values depending on the x-ray tube voltage within the range of 30–150 kV were computed for three materials containing the fillers of various kind. Lead, mixture of rare-earth oxides and mixture of tungsten carbide with zirconium oxide were investigated as fillers. X-ray tube voltage dependence on attenuation coefficient and lead equivalent were drawn.

Results: Distribution of the places on diminution of protective properties among the materials depended on x-ray tube voltage. Attenuation coefficient of the materials fell sharply at voltage increase. A simple comparison of various materials was possible only on noncrossing parts of voltage dependence of specific attenuation coefficient. Taking into account secondary radiation the use of protective means having in low-energy range attenuation coefficient more than $\sim 10^3$ was inexpedient. In order to compare the properties of materials containing fillers of various kind for the choice of protective material it should attract the reasons of functional expediency.

Conclusion: X-ray tube anode voltage dependence of specific attenuation coefficient is a significant index for comparison of x-ray protective materials of various kinds. Monotony of this dependence graph over the range of operational voltage is the necessary condition of material convenience for protective means. Indication of lead equivalent is uninformative as applied to nonlead materials.

Key words: x-ray protective composite materials, nonlead fillers, specific attenuation coefficient, lead equivalent

Упродовжостанніх кількох років більшість європейських країн і Російська Федерація прийняли вельми жорсткі обмеження використання свинцевмісних матеріалів у медицині [1]. Виробники рентгенозахисних матеріалів і продукції медичного призначення почали виступати індивідуальні талонами засоби захисту від ікс-променів на основі безсвинцевих наповнювачів. Поява нових матеріалів викликала ряд питань у практикуючих лікарів і спеціалістів, зайнятих у дозвільній системі МОЗ України. Ситуація ускладнюється відсутністю в Україні національної нормативної бази щодо засобів захисту від ікс-променів. В Росії з 2001 р. введені в дію три стандарти [2–4], які є фактич-

но перекладами однойменних стандартів Міжнародної електротехнічної комісії, орієнтованих на свинцевмісні захисні матеріали.

В Україні це ще справа майбутнього. Метою нашої роботи є кількісне порівняння захисних характеристик кількох матеріалів зі свинцевим і безсвинцевими наповнювачами в широкому діапазоні напруг на ікс-променевій трубці. Ширше її можна розглядати як спробу, по-перше, сформулювати деякі суттєві риси методичного підходу до оцінки й порівняння захисних властивостей матеріалів різних типів і, по-друге, надати всім зацікавленим особам інформацію, яка дозволить боці оцінити індивідуальні засоби захисту від ікс-проміння.

Методика дослідження

Дослідження мало розрахунково-експериментальний характер. На першому етапі тестували методику обчислення коефіцієнтів ослаблення матеріалів шляхом порівняння результатів розрахунків із результатами апаратних вимірювань. Методика розрахунку дозволяє зважати на реальні спектральні характеристики джерела ікс-проміння – в ній не використовується поняття ефективної енергії проміння. Тестування проводили на моноенергетичних ізотопних джерелах та ікс-променевих трубках із варіюванням напруги 20–150 кВ за допомогою зразків матеріалів простого та складного хімічного складу з відомими елементним складом і густиною. Деталі процесу тестування не наводимо як несуттєві для мети цієї роботи. Втім важливо, що в доступному для реальних вимірювань діапазоні коефіцієнтів ослаблення $K_{осл.} = 1-200$ максимальна розбіжність між їх розрахованими й вимірними значеннями для зразків із різним елементним складом не перевищувала 10% в усьому діапазоні розглянутих напруг.

На другому етапі розраховували коефіцієнти ослаблення ікс-проміння в геометрії вузького струменя для композиційних матеріалів з трьома типами наповнювачів. Як наповнювачі розглядали свинець металевий (СВ); суміш оксидів рідкісноземельних елементів, церієву фракцію – оксиди лантану, церію, неодиму, празеодиму (РЗО); суміш карбиду вольфраму й діоксиду цирконію (ВЦ). Досліджувався діапазон напруг 30–150 кВ як найважливіший із практичного погляду – він охоплює переважну більшість рентгенодіагностичних процедур, від стоматології до томографії. Щоб одержати якісну картину зіставлення захисних властивостей, було прийнято, що 1) всі матеріали виготовлені на основі полівінілхлоридної матриці, в яку введено 60% рентгенопоглинаючого наповнювача; 2) всі зразки мають однакові товщину (2,7 мм) і густину (2,1 г/см³), тобто однакову масову товщину 0,567 г/см². Спектри випромінювання ікс-променевої трубки для різних анодних напруг були взяті з довідника [5].

Для зразків усіх типів наповнювача за допомогою одержаних значень коефіцієнтів ослаблення розраховували свинцеві еквіваленти при відповідній напрузі на променевій трубці. За результатами розрахунків було побудовано два типи залежностей: $K_{осл.}(U_a)$ і $S_{екв.}(U_a)$, які зрізних боків характеризують функціональні властивості рентгенозахисних матеріалів. Залежність $S_{екв.}(U_a)$ для свинцевмісного матеріалу є, крім того, додатковим тестом: якщо всі розрахунки виконані правильно, вона графічно має бути близькою до прямої горизонтальної лінії.

Розглянуті в цій роботі зразки є реальними матеріалами, в яких для наочності прийняті однакові густина та товщина. Фактично при такому підході оцінюються й порівнюються питомі масові коефіцієнти ослаблення ікс-проміння зазначеними матеріалами при різній напрузі на ікс-променевій трубці.

Результати та їх обговорення

Аналіз результатів розрахунків свинцевого еквівалента в 1-му й 3-му рядках табл. 2 для зразка зі свинцевим наповнювачем свідчить, що відхилення від номінального значення свинцевого еквівалента $S_{екв.ном.}^{св}$ (мм) не перевищує 1,6%. Останній для даного зразка визначається, як

$$S_{екв.ном.}^{св} = \frac{d \cdot \rho \cdot p}{100 \cdot \rho_{св}} + S_{екв.}^{ПВХ} = 0,301 + S_{екв.}^{ПВХ},$$

де d – товщина зразка (мм); ρ – густина зразка (г/см³); $\rho_{св}$ – густина металевого свинцю (11,3 г/см³); p – відсотковий (щодо маси) вміст свинцю у зразку; $S_{екв.}^{ПВХ}$ (мм) – свинцевий еквівалент полівінілхлоридної матриці в композиційному матеріалі (масова товщина ПВХ $d_{in} = 0,567$ г/см²; $0,4 = 0,227$ г/см²).

Для наочності на рис. 1 і 2 зображені графіки залежності від напруги на ікс-променевій трубці відповідно до коефіцієнта ослаблення й свинцевого еквівалента для трьох розглянутих матеріалів.

Як можна побачити з таблиць і графіків, розподіл у порядку зменшення захисних властивостей між розглянутими матеріалами залежить від напруги на ікс-променевій трубці. В діапазоні напруг 30–65 кВ матеріали розташовані так: СВ, ВЦ, РЗО; в діапазоні 65–80 кВ – СВ, РЗО, ВЦ і в діапазоні 80–150 кВ – РЗО, СВ, ВЦ.

Найважливіша функція будь-яких засобів захисту – зниження експозиційної потужності дози ікс-проміння, що діє на об'єкт захисту. Оскільки в цій роботі порівнюються різні матеріали, а не засоби захисту як вигоди, припускається, що інші умови, які впливають на величину потужності дози за захистом (покрій і вага рентгенозахисного одягу, конструкція і масова товщина ширма ін.), ідентичні. В цьому випадку якість захисту може бути охарактеризована одним параметром – коефіцієнтом ослаблення ікс-проміння.

Коефіцієнт ослаблення ікс-проміння різко падає при підвищенні напруги на ікс-променевій трубці. Для свинцевмісного матеріалу він змінюється на понад 5 порядків при збільшенні напруги з 30 до 150 кВ (табл. 1 і рис. 1), для РЗО-матеріалу – у понад 60 разів, для ВЦ-матеріалу – майже на 4 порядки. Для всіх розглянутих матеріалів коефіцієнт ослаблення знижується монотонно. Вибір величини коефіцієнта ослаблення на етапі проектування засобів захисту здійснюється для максимальної напруги на ікс-променевій трубці, при якій планується їх використання (як правило, 100–125 кВ). Для розглянутих матеріалів такий підхід автоматично забезпечує збільшення коефіцієнта ослаблення,

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта ослаблення зразків із різними наповнювачами від напруги на ікс-променевої трубі
Dependence of attenuation coefficients of samples with different fillers on the voltage of x-ray tube

Зразок	Анодна напруга на ікс-променевої трубі, кВ								
	30	35	40	50	60	80	100	125	150
СВ	$1,33 \cdot 10^4$	$3,23 \cdot 10^4$	3750	283	72,5	15,4	8,35	6,06	4,60
РЗО	288	71,4	35,8	24,4	19,6	15,2	10,3	6,77	4,58
ВЦ	$2,39 \cdot 10^4$	1790	430	69,3	24,7	8,56	6,05	4,46	3,33

Таблиця 2 – Залежність свинцевого еквівалента (мм) зразка зі свинцевим наповнювачем від напруги на ікс-променевої трубі
Dependence of lead equivalent (mm) of the sample with lead fillers on the voltage of x-ray tube

Зразок	Анодна напруга на ікс-променевої трубі, кВ								
	30	35	40	50	60	80	100	125	150
СВ	0,302	0,305	0,306	0,307	0,308	0,310	0,310	0,310	0,311
$d_m = 0,227 \text{ г/см}^2$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,008
	0,307	0,307	0,307	0,307	0,307	0,307	0,307	0,307	0,309

Таблиця 3 – Залежність свинцевого еквівалента (мм) зразків із різними наповнювачами від напруги на ікс-променевої трубі
Dependence of lead equivalent (mm) of the sample with different fillers on the voltage of x-ray tube

Зразок	Анодна напруга на ікс-променевої трубі, кВ								
	30	35	40	50	60	80	100	125	150
СВ	0,302	0,305	0,306	0,307	0,308	0,310	0,310	0,310	0,311
РЗО	0,097	0,097	0,098	0,133	0,181	0,308	0,361	0,337	0,310
ВЦ	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202	0,213	0,240	0,238	0,230

а отже, й «додаткове» зниження потужності дози при переміщенні лівіше по осі напруг. Саме монотонність графіків (рис. 1) забезпечує таку можливість.

У медичній рентгенології прийнято характеризувати ослаблювальні властивості захисних матеріалів опосередковано, шляхом позначення їх свинцевого еквівалента. Поки абсолютна більшість медичних рентгенозахисних матеріалів виготовлялася на основі свинцю, це було вельми зручним і не могло приводити до непорозуміння під час інтерпретації результатів визначення захисних властивостей при різних напругах. Проте для захисних матеріалів з альтернативними наповнювачами опис у такий спосіб має очевидні вади. Графіки на рис. 2 наочно ілюструють це: свинцевий еквівалент матеріалів з альтернативними наповнювачами істотно змінюється при варіюванні напруги, хоча вимога «незменшення» захисних властивостей при зниженні напруги на ікс-променевої трубі неухильно виконується (рис. 1).

Порівняння числових значень коефіцієнтів ослаблення в табл. 1 (див. також рис. 1) демон-

струє деяку перевагу РЗО-матеріалів при напругах на трубі понад 80 кВ. Крива ослаблення ВЦ-матеріалів повністю знаходиться дещо нижче кривої для свинцевмісних матеріалів і майже еквідистантна до неї. При напрузі на трубі менше 80 кВ СВ-матеріали мають, на перший погляд, велику перевагу перед РЗО- і ВЦ-матеріалами. Насправді ж це не так однозначно. Щоб зрозуміти чому, згадаємо про засоби захисту, для створення яких власне й призначені ці матеріали, а також певні особливості практичного застосування. По-перше, реальний радіаційний стан у рентгенкабінеті визначається не лише прямим струменем ікс-променевої трубки, а й вторинним (розсіяним і відбитим) промінням, що створює умовно-ізотропний фон; потужність дози якого в залежності від обставин може складати від десятих часток до 1–2% потужності дози прямого струменя. По-друге, слід мати на увазі, шрні рентгенолога, ні пацієнта, які перебувають поблизу працюючого рентгенапарата, неможливо «упакувати» в захисний матеріал повністю – реальні засоби

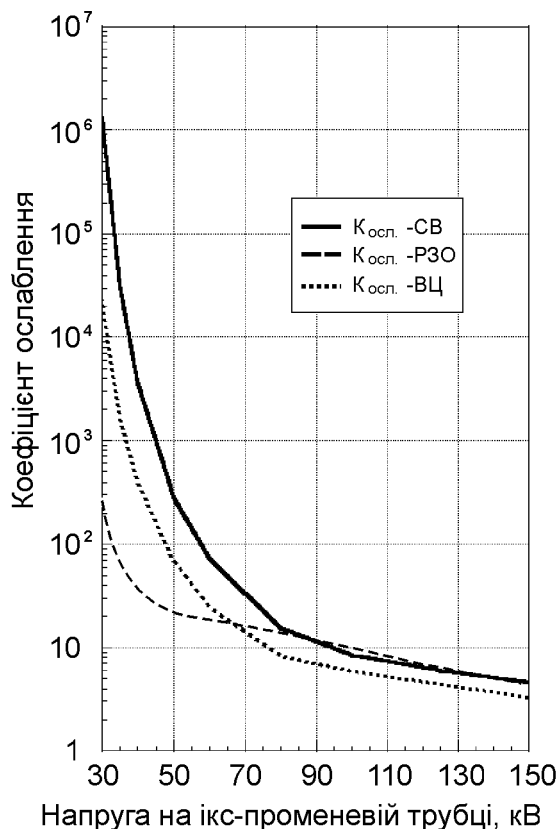


Рис. 1 – Графіки залежності коефіцієнта ослаблення ікс-проміння різними матеріалами від напруги на аноді ікс-променевої трубки (СВ – металевий свинець, Р3О – суміш оксидів рідкісноземельних елементів, ВЦ – суміш карбіду вольфраму та діоксиду цирконію)

Fig. 1 – Dependence of x-ray attenuation coefficients with different materials and anode voltage of x-ray tube (CB – metal lead, P3O – mixture of oxides of rare earth elements, BЦ – mixture of tungsten carbide and zirconium dioxide)

захисту, будь це одяг чи екрани, не забезпечують повної просторової ізоляції від навколишнього середовища об'єкта, який підлягає захисту.

Зробимо числову оцінку. Відома наближена формула для коефіцієнта ослаблення захисту з отворами

$$K_{осл.} \gg A / A_0,$$

де A – загальна площа захисту; A_0 – площа отворів, дозволяє оцінити внесок вторинного випромінювання до потужності дози за захистом. Як можна побачити з формули, при $A_0 \gg (0,1 \dots 0,2) A$ ослаблення потужності дози вторинного випромінювання складає $K_{осл.} \gg 5-10$, причому не залежить від коефіцієнта ослаблення матеріалу захисту. Враховуючи, що потужність дози вторинного випромінювання складає близько 1% від потужності дози прямого струменя, в першому наближенні можна вважати, що незалежно від коефіцієнта ослаблення матеріалу захисного

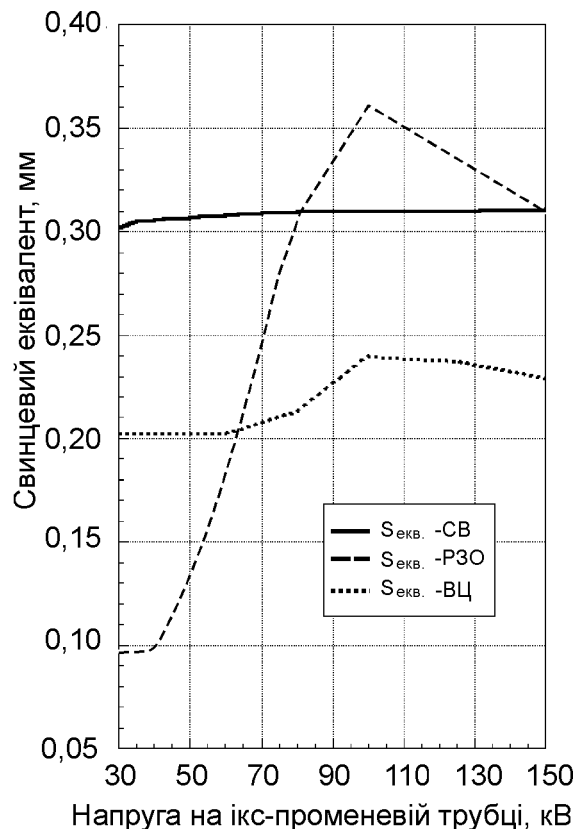


Рис. 2 – Графіки залежності свинцевого еквівалента різних матеріалів від напруги на аноді ікс-променевої трубки (позначки ті ж, що на рис. 1)

Fig. 2 – Dependence of lead equivalent of different materials and anode voltage of x-ray tube (figure captions: see Fig. 1)

одягу або екрана, потужність доз вторинного випромінювання за захистом буде складати близько 0,1% потужності дози первинного струменя.

Практично це означає недоцільність використання для захисту від прямого струменя проміння матеріалів із коефіцієнтом ослаблення понад 1000. Точніше, використовувати матеріали з більшим коефіцієнтом ослаблення технічно виправдано лише за умови різкого збільшення відношення A/A_0 . Тому перевага свинцевмісних матеріалів при низьких напругах, що видається дуже великою (коефіцієнт ослаблення до $\sim 10^6$ проти $\sim 10^4$ для ВЦ-матеріалів і ~ 300 для Р3О-матеріалів у нашому випадку), є формальною або, в усякому разі, такою, що принципово неможливо реалізувати при проектуванні реальних зразків індивідуальних і локальних засобів захисту.

Аналіз кількісних характеристик ослаблення ікс-проміння розглянутими матеріалами з ура-

хуванням вищенаведених міркувань демонструє відмінності методичних підходів до порівняння матеріалів на основі одного наповнювача і порівняння матеріалів із різними типами наповнювачів. У другому випадку для одержання порівняльних результатів доводиться застосовувати критерій порівняння, що спирається на уявлення про мету функціонування майбутнього виробу з того чи іншого матеріалу і виходить за межі суто матеріалознавчих характеристик. Фактично, коли результатом порівняння має бути вибір одного з кількох матеріалів, доводиться балансувати між принципами виправданості й оптимізації [6], враховуючи водночас мінімізацію потужності дози, шрдіє на об'єкт захисту, санітарно-гігієнічні, вагові та вартісні характеристики засобів захисту для досягнення прийняттого компромісу.

Відзначимо, що для випадку застосування різних матеріалів на основі одного наповнювача підхід до їх порівняння, по суті, однаковий, проте через якісну незмінність залежності $K_{осл.}(U_a)$ критерій порівняння істотно спрощується до суто матеріалознавчої характеристики — кількісного значення питомого коефіцієнта ослаблення (або свинцевого еквівалента) при заданій напрузі. В деяких випадках та для матеріалів на базі різних наповнювачів можна використовувати лише цю характеристику. Але для цього потрібно, щоб діапазон напруг експлуатації виробів даного класу збігався з розташованими порядділянками залежностей $K_{осл.}(U_a)$ для порівнюваних матеріалів.

Висновки

1. Розподілу порядку зменшення захисних властивостей серед розглянутих матеріалів залежить від напруги на ікс-променевій трубці. У діапазоні напруг 30–65 кВ матеріали розташовані так: СВ, ВЦ, РЗО; в діапазоні 65–80 кВ — СВ, РЗО, ВЦ; в діапазоні 80–150 кВ — РЗО, СВ, ВЦ.

2. Значущим показником для порівняння рентгенозахисних матеріалів різних типів є залежність питомого коефіцієнта ослаблення (відношення коефіцієнта ослаблення матеріалу в геометрії вузького струменя до його масової товщини) від анодної напруги на ікс-

променевій трубці. Традиційний спосіб опису захисних матеріалів за допомогою їх свинцевого еквівалента малоінформативний стосовно безсвинцевих матеріалів. Якщо використати поняття свинцевого еквівалента за якихось обставин неминуче, обов'язково потрібно, крім нього, зазначити й анодну напругу, при якій визначався свинцевий еквівалент.

3. Нормування захисних характеристик рентгенозахисних матеріалів при максимальній експлуатаційній напрузі виправдане за умови такого вибору матеріалу, при якому автоматично забезпечується збільшення коефіцієнта ослаблення матеріалу при зниженні напруги на ікс-променевій трубці.

4. Для порівняння матеріалів на основі різних типів наповнювачів у загальному випадку потрібний комплексний критерій, що відбиває в тому числі функціональне призначення і, ймовірно, деякі конструктивні особливості виробів, для виготовлення яких вони призначені. В окремих випадках або за певних умов як критерій для порівняння можна використовувати матеріалознавчу характеристику — питомий коефіцієнт ослаблення при заданій анодній напрузі на ікс-променевій трубці.

Література

1. Госкомитет Российской Федерации по охране окружающей среды. Доклад о свинцовом загрязнении окружающей среды и его влиянии на здоровье населения. — М., 1997.
2. ГОСТ Р 51532–99. Средства защиты от рентгеновского излучения в медицинской диагностике. Ч. 1. Определение ослабляющих свойств материалов.
3. ГОСТ Р 51532–99. Средства защиты от рентгеновского излучения в медицинской диагностике. Ч. 2. Защитные рентгеновские стекла.
4. ГОСТ Р 51532–99. Средства защиты от рентгеновского излучения в медицинской диагностике. Ч. 3. Защитная одежда.
5. Спектры излучения рентгеновских установок. Справочник / В.Н. Васильев, Л.А. Лебедев, В.П. Сидорин, Р.В. Ставицкий. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 144 с.
6. Публикация 37 МКРЗ. Оптимизация радиационной защиты на основе анализа соотношения «затраты–выгода». — М.: Энергоатомиздат, 1985.

Дата надходження: 18.02.2002.

Адреса для листування:
Пишнев Володимир Миколайович,
вул. Вакуленчука, 7, кв. 91, Дніпропетровськ, 49061, Україна