

ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЕФЕКТИВНИМ АТОМНИМ НОМЕРОМ ПРИ РАДІОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ОПОЛОНІН О.Д., РИЖИКОВ В.Д.

Робота присвячена проблемі підвищення інформаційності радіографічного контролю за рахунок покращення методів розділення матеріалів за ефективним атомним номером Z_{eff} . Наведено результати модельних обчислень сигналів сцинтиляційних детекторів рентгенівського випромінювання та нову методику характеристики матеріалів за Z_{eff} , яка пройшла експериментальну апробацію.

Ключові слова радіографія, ефективний атомний номер, сцинтилятор, масовий коефіцієнт ослаблення, рентгенівське випромінювання.

Key words radiography, effective atomic number, scintillator, mass attenuation coefficient, x-ray radiation.

Вступ

Поступова заміна плівкової радіографії на цифрову призвела до винайдення не тільки нових методів отримання тінювих рентгенівських зображень, але й до винайдення нових методів характеристики матеріалів та речовин за ефективним атомним номером. Суть цих методів полягає у наступному.

При радіографічному контролі у медицині, митному догляді, неруйнівному контролі зазвичай використовують джерела рентгенівського випромінювання (ДРВ), що генерують гальмівне рентгенівське випромінювання у діапазоні енергій 20÷150 кеВ.

Проходячи крізь об'єкт контролю (ОК) випромінювання ослаблюється. При цьому, змінюється баланс низько енергетичної та високо енергетичної складових рентгенівського спектру залежить від ефективного атомного номера (Z_{eff}) речовин, з яких складається ОК.

Роздільна реєстрація низько- та високо- енергетичної складових рентгенівського випромінювання, що пройшло крізь ОК, дозволяє оцінити Z_{eff} , тобто вирішити зворотну задачу – за сигналами відповідних детекторів характеризувати Z_{eff} ОК.

1. Фізичні аспекти характеристики матеріалів за Z_{eff} .

Інтенсивність рентгенівського випромінювання (РВ) ослаблюється, при проходженні крізь речовину, відповідно до відомого закону:

$$I(E) = I_0(E) \cdot e^{-\mu(E) \cdot x} = I_0(E) \cdot e^{-\mu_m(E) \cdot \rho \cdot x} \quad (1)$$

де $I_0(E)$ – початкова інтенсивність рентгенівського випромінювання, $\mu(E)$ – лінійний коефіцієнт ослаблення, $\mu_m(E)$ – масовий коефіцієнт ослаблення, ρ – щільність, x – товщина шару речовини. $I_0(E)$ характеризує спектр РВ, який за допомогою анодної напруги ДРВ та фільтрів можна змінювати.

На рис. 1. наведено спектри РВ при різних анодних напругах U_a для ДРВ з вольфрамовим анодом

при використанні алюмінієвого фільтру, товщиною 4мм. Використовуючи різні фільтри (алюміній, мідь, вольфрам, тощо), можна отримувати спектри РВ у різних енергетичних діапазонах (рис. 2.)

Масові коефіцієнти ослаблення для всіх елементів таблиці Д.І. Менделєєва наводяться у довідниках, наприклад [1]. Нами було проаналізовано масові коефіцієнти ослаблення $\mu_m(E)$ для елементів із Z від 1 до 92. За результатами аналізу $\mu_m(E)$ для значень E від 20кеВ до 150кеВ було виділено три групи елементів $A \in \{Z=1, 2\}$; $B \in \{3 \leq Z \leq 42\}$; $C \in \{Z \geq 43\}$.

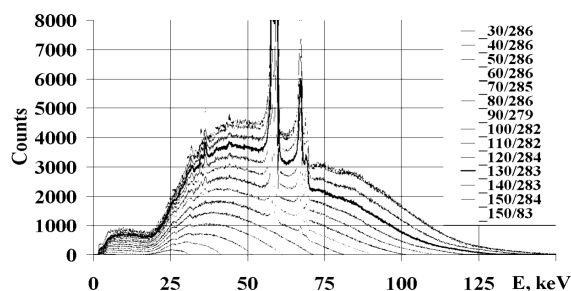


Рис. 1. Спектри РВ при різних анодних напругах

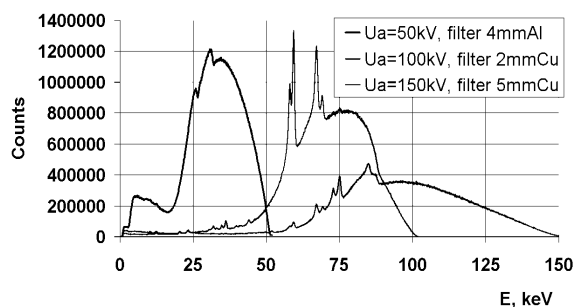


Рис. 2. Спектри РВ у різних енергетичних діапазонах

До групи А входять водень та гелій, які порівняно з іншими елементами мають менш повільне зменшення коефіцієнта ослаблення при збільшенні енергії (рис. 3).

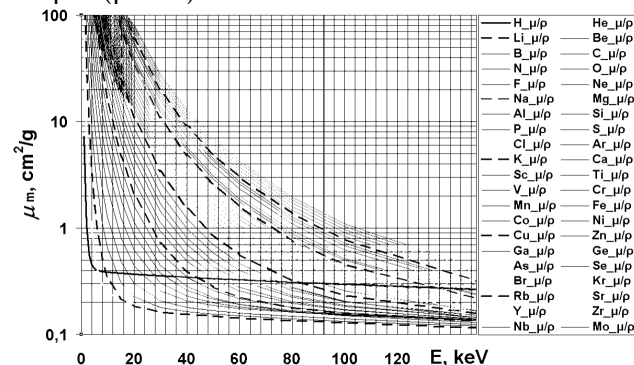


Рис. 3. Енергетична залежність масового коефіцієнта ослаблення для елементів із Z від 1 до 42

До групи В було віднесено елементи з Z від 3 до 42. Як можна бачити з рис. 3, елементи групи В не мають К стрибка поглинання у діапазоні енергій 20-150 кеВ, а характер залежності $\mu_m(E)$ є монотонним.

Якщо ОК містить матеріали та речовини, що складаються тільки з елементів групи В, то вони можуть бути однозначно характеризовані за ефективним атомним номером Z_{eff} при обчисленні параметра, пропорційного μ_m .

Група С – елементи що мають К стрибок поглинання у діапазоні енергій 20-150 кеВ, тому визначення для них Z_{eff} має певні труднощі. Однак, при використанні спектрометричних детекторів (наприклад напівпровідникових) такі елементи або групи елементів можуть бути характеризовані за Z по енергії К стрибка.

Ефективний атомний номер для обраного діапазону енергій 20÷150кеВ, де переважними механізмами взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною є фотоефект та комптонівське розсіювання, обчислювався за формулою:

$$Z_{\text{eff}} = \left[\sum_{k=1}^N a_k A_k Z_k^4 / \sum_{k=1}^N a_k A_k Z_k \right]^{1/3} \quad (2)$$

де A_k та Z_k – атомна маса та атомний номер простих елементів, N – загальна кількість простих елементів, a_k – відносна атомна (молярна) концентрація. Для a_k має виконуватись умова: $\sum_{k=1}^N a_k = 1$.

2. Методи характеристики матеріалів за Z_{eff}

У медицині, митному догляді, неруйнівному контролі широко використовується метод під загальною назвою DXA (dual-energy x-ray absorptiometry).

Однак, у конкретних цифрових радіографічних системах (ЦРС), реалізація цього методу здійснюється по-різному. Зазвичай ЦРС скануючого типу використовує двоенергетичну лінійку детекторів (ЛД), вихідними сигналами якої є L – сигнал детектора низькоенергетичної складової спектру РВ, H – сигнал детектора високоенергетичної складової спектру РВ. Результати модельних обчислень сигналів двоенергетичного детектора наведено у [2].

У двоенергетичних ЦРС для митного контролю, характеристику матеріалів за Z_{eff} здійснюють у координатах (H, L) , як наведено на рис. 4.

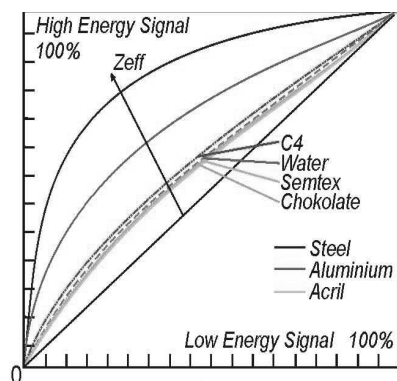


Рис. 4. Прямий метод характеристики вмісту багажу за Z_{eff} (фірма Smith Heimann)

Прямий метод характеристики потребує низки калібрувань, з метою отримання таблиці даних – значень (H, L) за наявності ОК різної товщини та Z_{eff} .

Другий метод – характеристика речовин та матеріалів за співвідношенням сигналів двоенергетичної лінійки детекторів H/L [2]. Такий метод широко використовувався нами на попередньому етапі досліджень. При розділенні речовин за співвідношенням сигналів, параметр розділення H/L згідно (1) має суттєву залежність від товщини та щільності ОК.

Третій метод, запропонований нами, використовує параметр, який пропорційний масовому коефіцієнту ослаблення μ_m , та дозволяє покращити розділення речовин за Z_{eff} майже не залежно від товщини ОК. Такий підхід дозволяє, наприклад у медицині, більш точно визначити мінералізацію кісткової тканини, на фоні м'язової тканини, яка має змінну товщину.

Нами розроблено метод реконструкції параметра P , пропорційного ефективному атомному номеру для триенергетичної радіографії з застосуванням кусочно-лінійної апроксимації для двох та більше енергетичних діапазонів (рис. 5):

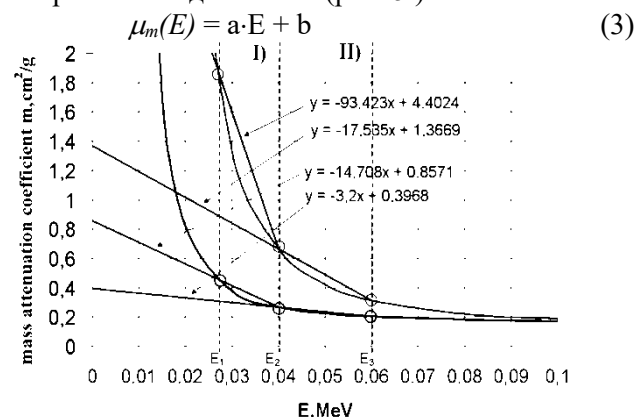


Рис. 5. Кусочно – лінійна апроксимація масового коефіцієнту ослаблення $\mu_m(E)$ для двох різних речовин (м'язова та кісткова тканини) у двох енергетичних діапазонах (I та II)

Новий метод надає базові співвідношення сигналів лінійки детекторів отриманих у трьох енергетичних діапазонах: означимо H – сигнал детектора високих енергій (E_3), M – сигнал детектора середніх енергій (E_2), L – сигнал детектора низьких енергій (E_1). Відповідно до (1):

$$L = I_0 \cdot e^{-\mu_m(E_1) \cdot \rho \cdot x} \quad (4)$$

$$M = I_0 \cdot e^{-\mu_m(E_2) \cdot \rho \cdot x} \quad (5)$$

$$H = I_0 \cdot e^{-\mu_m(E_3) \cdot \rho \cdot x} \quad (6)$$

Застосувавши логарифмування до (4-6), отримуємо:

$$\mu_m(E_2) \cdot \rho \cdot x = \ln(I_0 / M) \quad (7)$$

$$\mu_m(E_1) \cdot \rho \cdot x = \ln(I_0 / L) \quad (8)$$

$$\mu_m(E_3) \cdot \rho \cdot x = \ln(I_0 / H) \quad (9)$$

Використавши лінійну апроксимацію масових коефіцієнтів ослаблення для кожної енергії

випромінювання (3), з (7-9) отримуємо наступні вирази для співвідношення масових коефіцієнтів ослаблення [3]:

$$\mu_{H/M} = \frac{\mu_m(E_3)}{\mu_m(E_2)} = \frac{Ln(I_0/H)}{Ln(I_0/M)} = \frac{a_{II} \cdot E_3 + b_{II}}{a_{II} \cdot E_2 + b_{II}} \quad (10)$$

$$\mu_{M/L} = \frac{\mu_m(E_2)}{\mu_m(E_1)} = \frac{Ln(I_0/M)}{Ln(I_0/L)} = \frac{a_I \cdot E_2 + b_I}{a_I \cdot E_1 + b_I} \quad (11)$$

де a_I, a_{II}, b_I, b_{II} – коефіцієнти лінійної апроксимації (3) для I та II енергетичних діапазонів (рис. 5).

Тоді, для кожного з енергетичних діапазонів може бути обчислений коефіцієнт a , що характеризує кут нахилу апроксимаційної прямої, який у свою чергу характеризує масовий коефіцієнт ослаблення для даного енергетичного під діапазону (I та II):

$$P(M, L) = a_I = \frac{(Ln(I_0/M)/Ln(I_0/L)) - 1}{E_2 - E_1 \cdot (Ln(I_0/M)/Ln(I_0/L))} \cdot b_I \quad (12)$$

$$P(H, M) = a_{II} = \frac{(Ln(I_0/H)/Ln(I_0/M)) - 1}{E_3 - E_2 \cdot (Ln(I_0/H)/Ln(I_0/M))} \cdot b_{II} \quad (13)$$

Таким чином, для кожної пари детекторів можна отримати параметр, що характеризує кут нахилу апроксимаційної прямої (3) для масового коефіцієнта ослаблення.

3. Експеримент

На попередніх етапах роботи нами було отримано тінюві радіографічні зображення [3] набору тестових ОК у трьох енергетичних діапазонах, відповідно до рис. 2.

У якості тестових об'єктів обрано набір із різноманітних речовин та матеріалів (рис. 6.) із різними значеннями Z_{eff} та $\rho \cdot x$. У якості тестових ОК обрано тверді та сипучі матеріали із Z_{eff} від 6 до 29. Тверді матеріали (крім вуглецю) мають форму ступінчатого клину, що дозволяє оцінити залежність параметра характеристики матеріалів за Z_{eff} від щільності та товщини ОК ($\rho \cdot x$). Значення Z_{eff} обчислено за формулою (2).

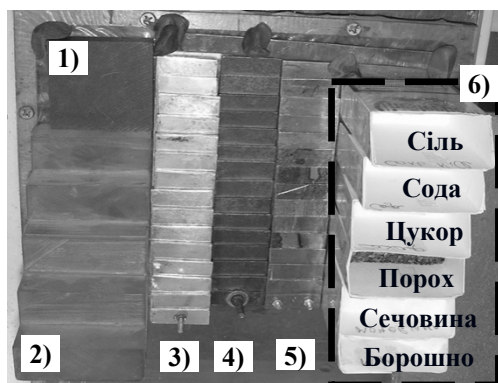


Рис. 6. Світлина тестових ОК: 1) Вуглець $Z=6$; 2) Поліметилметакрилат $Z_{eff}=6.48$; 3) Алюміній $Z=13$; 4) Сталь $Z=26$; 5) Мідь $Z=29$; 6) набір сипучих матеріалів: Сіль $Z_{eff}=15.9$; Сода $Z_{eff}=8.76$; Цукор $Z_{eff}=6.93$; Сечовина $Z_{eff}=6.83$.

За результатами отримання триенергетичного зображення проведено порівняння трьох методів характеристики матеріалів за Z_{eff} для різних енергетичних діапазонів. Для розділення матеріалів за Z_{eff} використано 2D мапу крапок, де кожному пікселю радіографічного зображення відповідає окрема крапка на площині у координатах сигналів детекторів H, M, L та похідних від них величин H/L, M/L, H/L, P(H/L), P(M/L), P(H/L), що характеризують ОК за Z_{eff} та $(H+M+L)/3$ – характеризує ослаблення потоку випромінювання.

Як можна бачити з рис. 7а (відповідає рис. 4.), у різних координатах (H,L), (M,L), (H,L) розділення речовин за Z_{eff} тим краще, чим більше різниця між енергіями. У координатах (H,L) розділення найбільше, але помітний істотний вплив розсіяного випромінювання, що погіршує точність розділення речовин при ослабленні початкового потоку випромінювання більш ніж на 97%.

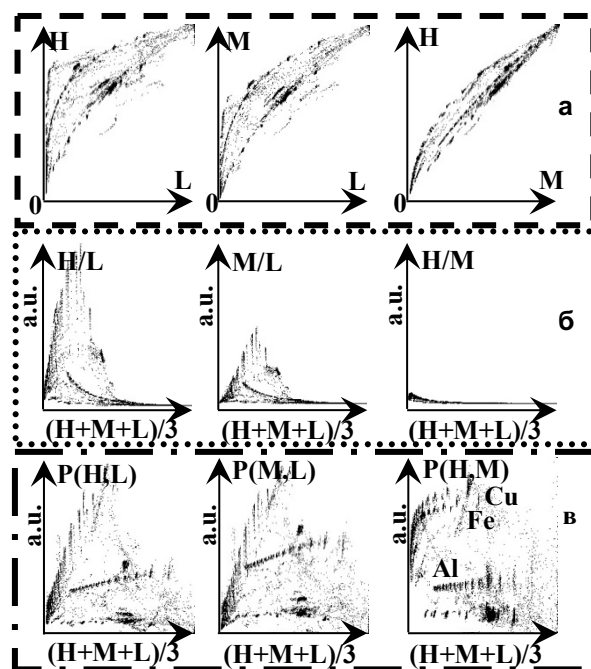


Рис. 7. 2D мапи крапок для трьох методів розділення речовин за Z_{eff} , з використанням сигналів детекторів у трьох енергетичних діапазонах H, M, L: а) прямий метод розділення; б) метод розділення речовин за співвідношенням сигналів в) метод розділення речовин з обчисленням параметра, пропорційного масовому коефіцієнту ослаблення μ_m .

Прямий метод потребує калібрування ЦРС з використанням тестових об'єктів, аналогічних використаним нами – матеріали з різним значенням Z_{eff} та змінної товщини.

Метод співвідношення сигналів також надає параметр характеристики, що нелінійно залежить від товщини та щільності матеріалу (рис. 7б) і таж потребує ретельного попереднього калібрування ЦРС.

Запропонований нами новий метод характеристики речовин з обчисленням параметра, пропорційного масовому коефіцієнту ослаблення $P \sim \mu_m$ дозволяє практично виключити вплив щільності і товщини на значення параметра характеристики (рис. 7,в).

Для оцінки можливостей застосування дво- та три- енергетичних ЦРС у медицині отримано тінюві рентгенівські зображення біологічних ОК у різних енергетичних діапазонах. У якості ОК обрано фрагменти птиці (окорок бройлерної курки, окорок свійської курки, крило індики).

В медицині важливо визначити мінералізацію кісткової тканини (діагностика остеопорозу) на фоні м'язової тканини.

Використовуючи 3D мапи крапок та RGB палітру, отримано триенергетичне радіографічне зображення біологічних ОК (рис. 8).

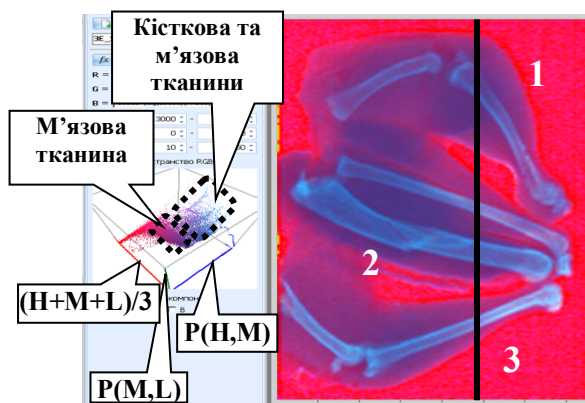


Рис. 8. Триенергетичне тінюве радіографічне зображення фрагментів свійських птахів, побудоване з використанням 3D RGB палітри. 1) окорок бройлерної курки; 2) крило індики; 3) стегно домашньої курки.

RGB палітра (ліворуч): $R \sim (H+M+L)/3$; $G \sim P(M,L)$; $B \sim P(H,M)$

Використовуючи запропоновану методику розділення речовин за параметром P , пропорційним масовому коефіцієнту ослаблення μ_m , проведено характеристику кісткової тканини біологічних ОК на фоні м'язової тканини змінної товщини. На рис. 9а наведено у графічному вигляді рівні сигналів 78 каналу лінійки детекторів (вертикальна чорна лінія на рис. 8) відповідно до радіографічного зображення.

Показано (рис. 9б), що при зміні товщини м'язової тканини (рис. 9а) обчислений параметр $P(H,L)$ фактично не залежить від товщини м'язової тканини для усіх обраних біологічних ОК. У той самий час, чітко можна бачити, що значення параметру $P(H,L)$ для ділянок з кістковою тканиною, пропорційне вмісту кальцію у кістковій тканині. Кальцій є найбільш вагомою часткою мінералізації кісткової тканини та має найбільший атомний номер. За результатами хімічного

аналізу, вміст кальцію у кістковій тканині біологічних ОК становить: 1) бройлерна курка – $1,6 \div 2,8$ %; 2) крило індики – $3,4 \div 4,4$ %; 3) домашня курка – $2,8 \div 4,4$ %. Для діагностики остеопороза використовують як традиційну радіографію (виявляє $20 \div 40$ % зміну мінералізації кісткової тканини) так і двоенергетичну рентгенівську абсорбціометрію (чутливість до зміни мінералізації $2 \div 3$ %). З рис. 8. та рис. 9 можна бачити, що експериментально підтверджена можливість виявлення природного розподілу мінералізації кісткової тканини у межах $1 \div 2$ %.

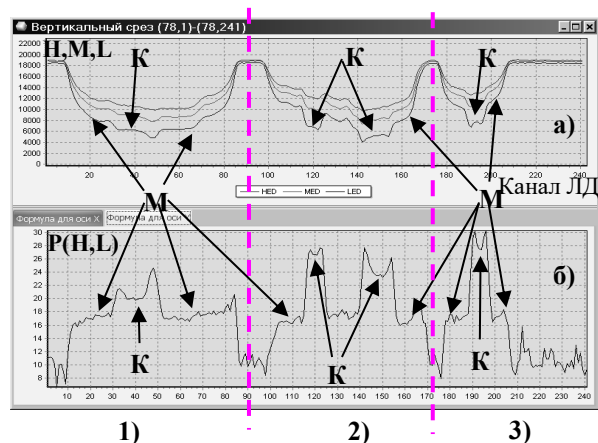


Рис. 9. Сигнали 78-го каналу ЛД а) та обчислені значення параметру характеристики $P(H,L)$ б) для зображення на рис.8. К – відповідає кістковій тканині на фоні м'язової тканини; М – відповідає м'язовій тканині. 1), 2), 3) – відповідає позначкам 1, 2, 3

В цілому, медичне застосування двоенергетичних ЦРС визначається тим фактом, що тільки 2 типи тканин людини мають енергетичну залежність $\mu_m(E)$, що значно відрізняється від води. Це жирова та кісткова тканини (рис. 10). Відомо також, використання методів характеристики речовин у мамографічних дослідженнях, де за співвідношенням сигналів H/M та різницею сигналів $H-L$ проводять диференціювання пухлинних утворень та місць кальцинації у молочній залозі. Можливо двоенергетична рентгенівська абсорбціометрія може бути використана у стоматології, урології (дагностика сечокам'яної хвороби), тощо. Застосування методів характеристики речовин за Z_{eff} у неруйнівному контролі та технічній діагностиці може бути пов'язане насамперед з виявленням неоднорідності сумішей речовин, що мають різні значення Z_{eff} та виявленням продуктів корозійних процесів, дифузії одних матеріалів у інші, тощо.

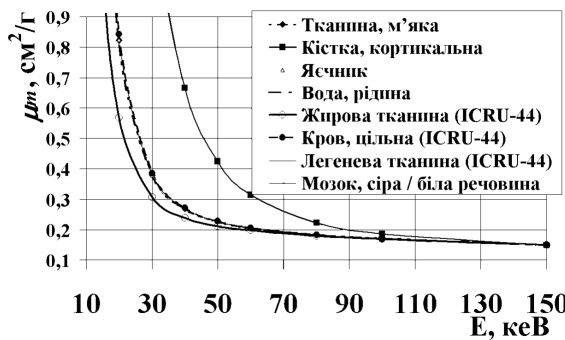


Рис. 10. Масовий коефіцієнт ослаблення $\mu_m(E)$ для різних органів та тканин людини

4. Аналіз чинників, що впливають на точність характеристики речовин та матеріалів за Z_{eff}

Проаналізовано наступні основні чинники, що впливають на точність характеристики речовин та матеріалів за Z_{eff} : розкид параметрів детекторів; вплив розсіяного випромінювання; пульсації рентгенівського випромінювання; шуми квантування аналого – цифрового перетворювача.

Для усунення впливу розкиду параметрів детекторів, який може становити до 30% ("темнові" струми та рентгеночутливість) нами було запропоновано та реалізовано механізм поканального змінення напруги зміщення та коефіцієнту підсилення на базі швидкодіючих комутаторів та цифро-аналогових перетворювачів (апаратне калібрування). Також, використовувалось програмне калібрування. Додатково, детектори типу СЦ-ФД можуть мати розкид енергетичної залежності чутливості, який суттєво (до 20%) впливає на значення $P(H,L)$.

На характеристику матеріалів розсіяне випромінювання також має суттєвий вплив. Використовуючи сталевий ступінчатий клин 1÷15мм, були отримані три радіографічних зображення при трьох анодних напругах: 50, 100, 150 кВ. Рівні сигналів лінійки детекторів в залежності від товщини сталевго клину наведено на рис.11.

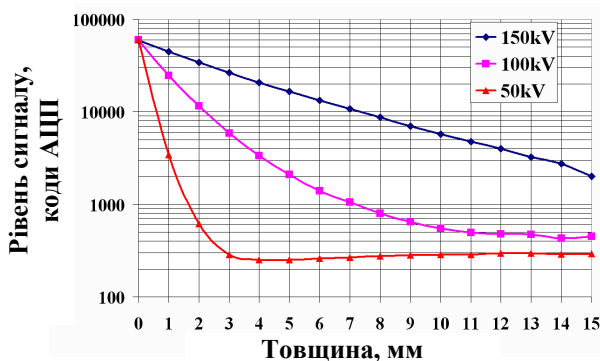


Рис. 11. Рівні сигналів ЛД, при просвічуванні сталевго клину, при різних анодних напругах
За відсутності ОК сигнал ЛД калібрувався за рівнем 60000 у кодах АЦП, за відсутності випромінювання рівень калібрування становив 250. Як можна бачити з рис. 11, при ослабленні

сигналу до рівня ≈ 2000 (ослаблення $\approx 97\%$) вклад розсіяного випромінювання в сигнал детектора не значний. При більшому ослабленні рентгенівського випромінювання, вклад розсіяного випромінювання в сигнал детектора стає суттєвим і викривляє викривлення параметру характеристики речовин за Z_{eff} .

Нами, також, було проведено аналіз впливу шумів квантування на параметр характеристики матеріалів H/L . За низького рівня сигналів, коли змінення рівня сигналу на 1 код АЦП стає вагомим, точність характеристики погіршується. За результатами модельних обчислень співвідношення сигналів [2] для заліза та цукру отримано можливі відхилення параметру характеристики H/L (рис. 12).

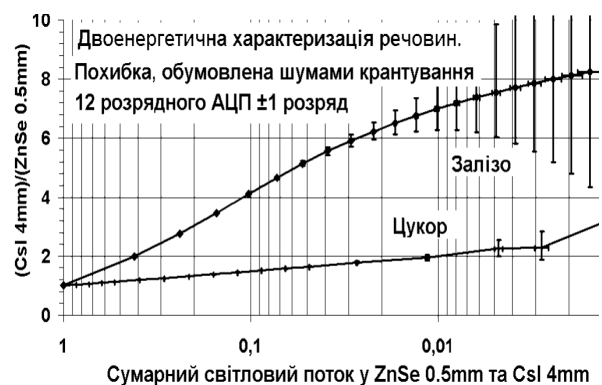


Рис. 12. Моделювання похибки обчислення параметру характеристики матеріалів - H/L , пов'язану з шумами квантування 12 розрядного АЦП

Ще одне джерело похибки характеристики матеріалів - нестабільність потоку РВ. Для скануючих ЦРС, наприклад для митного контролю, застосовуються попередні підсилювачі типу перетворювач струм-напруга з постійною часу 10мс. Тому, пульсації потоку рентгенівського випромінювання під час сканування (від декількох секунд до декількох хвилин), також можуть впливати на точність вимірювань. Сучасні рентгенівські апарати забезпечують стабілізацію як струму так і анодної напруги на рівні $\pm 0,5\%$.

5. Висновки

Отримані результати дають підстави сформулювати відповідні висновки та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

Підтверджено, що використовуючи зміну анодної напруги та фільтри з Al, Cu, при різних анодних напругах джерела рентгенівського випромінювання, можна отримати рентгенівське випромінювання у енергетичних вікнах 20÷50 кеВ, 50÷100 кеВ, 60÷150кеВ, тощо.

Розроблено новий метод характеристики матеріалів та речовин за ефективним атомним номером, що дозволяє, використовуючи сигнали двота мульті- енергетичних детекторів, обчислити параметр, пропорційний масовому коефіцієнту

ослаблення μ_m , практично однозначно пов'язаний з ефективним атомним номером Z_{eff} . Таким чином, була мінімізована залежність параметру характеристики матеріалів від товщини та щільності ($\rho \cdot x$) досліджуваних ОК.

Результати експериментальних досліджень, проведених на базі макетних зразків ЦРС довели можливість вимірювання розподілу мінералізації кісткової тканини на фоні м'язової тканини для біологічних ОК у межах зміни мінералізації на 1-2%.

Новий метод характеристики матеріалів за ефективним атомним номером може бути використаний для всіх типів ЦРС, що здатні отримувати радіографічні зображення у різних енергетичних діапазонах. Крім того, перспективним є використання методу у комп'ютерній томографії, де може бути здійснена характеристика матеріалів для кожного вокселя об'ємного зображення.

Література:

1. *Немец О.Ф., Гофман Ю.В.* Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975, 416с.
2. *Рижиков В.Д., Ополонин А.Д., Козин Д.Н., Лисецкая Е.К., Даниленко В.Л.* Возможности двухэнергетического детектирования на основе пары «сцинтиллятор-фотодиод» в цифровой медицинской радиологии // *Вісник НТУУ „Київський політехнічний інститут”*. серія „Приладобудування”. 2005. 29. С. 128-134.
3. *Opolonin O.D., Ryzhikov V.D.* Increasing informativity of digital radiographic systems // *Functional materials*. 2013. №4. С. 528–533.

Transliterated bibliography:

1. *Nemets O.F., Gofman Yu.V.* Spravochnik po yadernoy fizike. Kiev: Naukova dumka, 1975, 416s.
2. *Rizhikov V.D., Opolonin A.D., Kozin D.N., Lisetskaya E.K., Danilenko V.L.* Vozmozhnosti dvuh-energeticheskogo detektirovaniya na osnove paryi «scintillyator-fotodiod» v tsifrovoy meditsinskoj radiografii // *Vіsник NTUU „KiYivskiy politehnichniy Institut”. seriya „Priladobuduvannya”*. 2005. 29. С. 128-134
3. *Opolonin O.D., Ryzhikov V.D.* Increasing informativity of digital radiographic systems // *Functional materials*. 2013. №4. С. 528–533.

Надійшла до редколегії 23.02.2020

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. Сліпченко М.І.

Ополонін Олександр Дмитрович, науковий співробітник, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України (ISMA НАН України). Наукові інтереси: цифрова радіографія, детектори іонізуючих випромінювань. Адреса: Україна, 61000, Харків, пр. Науки, 60, ISMA НАН України.

Opolonin Oleksandr Dmytrovych, Researcher, Institute of Scintillation Materials, NAS of Ukraine (ISMA, NAS of Ukraine). Scientific interests: digital radiography, detectors of ionizing radiation. Address: Ukraine, 61000, Kharkov, ave. Nauki 60, ISMA, NAS of Ukraine.

Рижиков Володимир Діомидович, д-р фіз.-мат. наук, проф., головний науковий співробітник, Наукові інтереси: цифрова радіографія, детектори іонізуючих випромінювань. Адреса: Україна, 61000, Харків, пр. Науки, 60, ISMA НАН України.

Ryzhikov Volodymyr Diomydovych, DrSc, Prof., Chief Researcher. Scientific Interests: digital radiography, detectors of ionizing radiation. Address: Ukraine, 61000, Kharkov, ave. Nauki 60, ISMA, NAS of Ukraine.