

В.Д. РИЖИКОВ, доктор фіз.-мат. наук, проф., завідувач відділенням ІСМА НАН України, Харків

О.Д. ОПОЛОНІН, заст. завідувача відділу ІСМА НАН України, Харків

В.Г. ВОЛКОВ, заст. завідувача відділу ІСМА НАН України, Харків

О.К. ЛИСЕЦЬКА, канд. хім. наук, ст. науковий співробітник, ІСМА НАН України, Харків

С.Н. ГАЛКІН, канд. хім. наук, завідувач відділу ІСМА НАН України, Харків

Е.Ф. ВОРОНКІН, канд. техн. наук, заст. завідувача відділу ІСМА НАН України, Харків

ДВОХЕНЕРГЕТИЧНА ЦИФРОВА РЕНТГЕНОГРАФІЧНА СИСТЕМА З МОЖЛИВІСТТЮ РОЗДІЛЕННЯ РЕЧОВИН ЗА ЕФЕКТИВНИМ АТОМНИМ НОМЕРОМ

Дослідження з отримання двоенергетичних зображень дали можливість розширити галузі застосування цифрової радіографічної системи завдяки можливості визначення ефективного атомного номера Z_{eff} речовин, що входять до складу досліджуваного об'єкту. Показана можливість розділення речовин для «легких» елементів з Z_{eff} від 6 до 13, а також води (H_2O) $Z_{\text{eff}} \approx 7.43$ та гліцерину ($\text{CH}_2\text{OHCHONCH}_2\text{OH}$) $Z_{\text{eff}} \approx 6.87$.

A method is considered for discrimination of substances composing the inspected object by means of determination of effective atomic number Z_{eff} . Possibility is shown of separate detection of "light" substances formed by elements with Z_{eff} from 6 to 13, as well as water (H_2O) with $Z_{\text{eff}} \approx 7.43$ and glycerol ($\text{CH}_2\text{OHCHONCH}_2\text{OH}$) with $Z_{\text{eff}} \approx 6.87$.

Вступ. Світовою тенденцією розвитку радіографічного методу неруйнівного контролю (НК) є поступовий перехід від реєстрації тінювих рентгенівських зображень за допомогою рентгеночутливої плівки до використання цифрових радіографічних систем (ЦРС) [1-5].

На сьогодні плівковий радіографічний контроль (ПРК) залишається одним з найважливіших методів неруйнівного контролю і технічної діагностики (НК і ТД) завдяки високій просторовій роздільній здатності: 15 ÷ 20 пар ліній/мм.

Суттєвою перевагою ЦРС є краща ніж при ПРК контрастна роздільна здатність у широкому динамічному діапазоні та можливість застосування математичних методів обробки зображення [5].

Використання двоенергетичних ЦРС з подвійною лінійкою детекторів (ЛД) надає оператору принципово нову, порівняно з ПРК, можливість – розділення речовин, що входять до складу досліджуваного об'єкту, за ефективним атомним номером Z_{eff} . Найбільше поширення такі ЦРС знайшли у митному догляді та останнім часом у медицині [6-14].

Постановка задачі. Головною метою роботи є дослідження двоенергетичної ЦРС щодо можливості розділення речовин з різним ефективним атомним номером Z_{eff} . Типовим для двоенергетичних ЦРС є розділення Z_{eff} на три піддіапазони 1) "легкі" речовини з $Z_{\text{eff}} \leq 10$; 2) "важкі" речовини з $Z_{\text{eff}} \geq 20$; 3) "проміжні" речовини $10 < Z_{\text{eff}} < 20$. Найбільш важливим для митного контролю, медицини, неруйнівного контролю композитних матеріалів, тощо є розділення речовин у діапазоні $Z_{\text{eff}} < 13$.

Основна частина. Для вирішення поставленої задачі нами було обрано об'єкти досліджень, що містять Al ($Z_{\text{eff}} = 13$), C ($Z_{\text{eff}} = 6$), H_2O ($Z_{\text{eff}} \approx 7.43$) та гліцерин ($Z_{\text{eff}} \approx 6.87$).

Дослідження проведено на базі макету двоенергетичної ЦРС (див. рис. 1.) до складу якого входять:

- джерело рентгенівського випромінювання (ДРВ) РАПАН 140/140 ($U_{a \text{ max}} = 140 \text{ кВ}$, $I_{a \text{ max}} = 1 \text{ мА}$);
- механізм переміщення та обертання об'єкта контролю (ОК);
- приймально-детектуючий тракт (ПДТ) з подвійною лінійкою детекторів (ЛД).

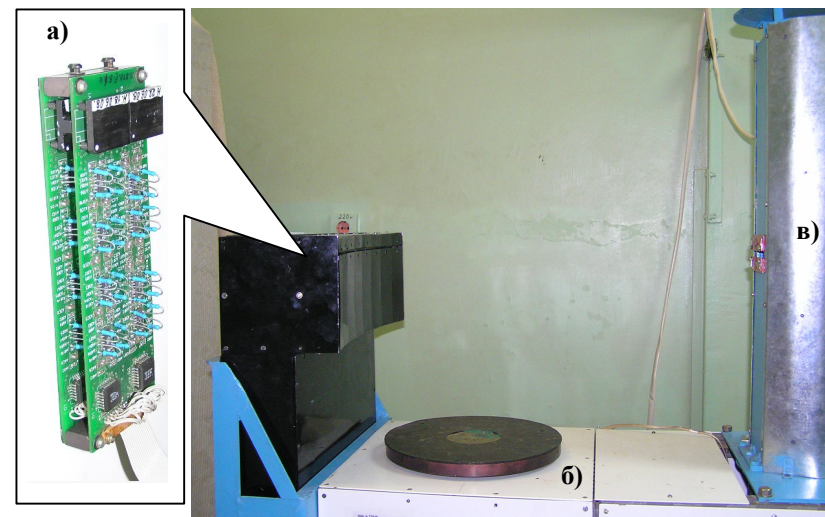


Рис. 1. Макетний зразок ЦРС на базі ПДТ з лінійкою 32 каналних детекторів. а) подвійна ЛД, б) пристрій переміщення та обертання об'єкту, в) ДРВ.

Наявність у складі макету механізму обертання забезпечило реалізацію режиму багаторакурсного сканування (60 ракурсів), що здатний суттєво підвищити інформативність неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Метод двоенергетичного розділення речовин за ефективним атомним номером полягає у аналізі двох тінювих рентгенівських зображень, отриманих у різних енергетичних діапазонах. Такі зображення можуть бути отримані двома шляхами. Перший шлях – використання подвійної ЛД (рис. 1.а). Другий – послідовне отримання двох зображень з використанням однієї ЛД, але при різних анодних напругах з подальшим суміщенням зображень.

Для першого випадку нами проведено модельні обчислення співвідношення сигналів детекторів низькоенергетичного випромінювання (НД) та детекторів високоенергетичного випромінювання (ВД) за умов розташування ВД позаду НД. Схему взаємного розташування ДРВ, ОК, НД (ZnSe) та ВД (CsI) для проведення модельних обчислень відображено на рис. 2. На рис. 3. наведено результати обчислень у координатах (ВД+НД) – вісь абсцис та (ВД/НД) – вісь ординат.

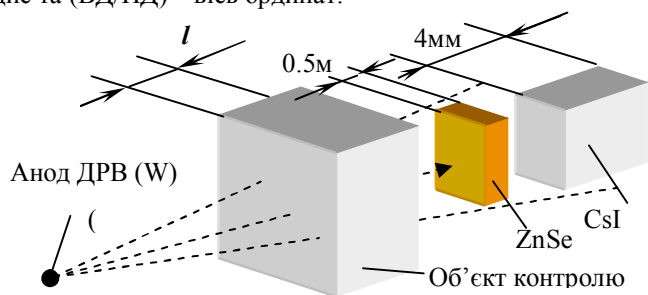


Рис. 2. Схема взаємного розташування ДРВ, ОК, НД (ZnSe) та ВД (CsI) для проведення модельних обчислень

Для такої спрощеної моделі, де не враховується наявність фотодіоду (ФД) між НД та ВД, було обчислено світлові потоки у кожному з кристалів при наявності ОК різної товщини. У якості ОК розглянуто: Al, Cu, Fe, NaCl, H₂O, C₁₂H₂₂O₁₁ (цукор). Для обчислень використано спектр рентгенівської трубки з вольфрамовим анодом при напрузі 150кВ.

Виходячи з того, що сумарний сигнал ВД та НД несе інформацію про загальне ослаблення випромінювання у ОК та пропорційний добутку $\rho \cdot l$, де ρ – щільність матеріалу ОК, l – товщина ОК у напрямку проходження рентгенівського випромінювання, а відношення сигналів ВД до НД характеризує ефективний атомний номер матеріалу ОК, було побудовано графік відповідної залежності для наведених вище матеріалів ОК (рис.3.). Графік побудовано з використанням нормованих сигналів НД та ВД, тому відношення ВД/НД (ось ординат) за відсутності ОК дорівнює 1, а сумарний сигнал ВД+НД (ось абсцис) за відсутності ОК також прийнято за одиницю.

З графіку (рис.3) можна бачити, що за допомогою методу двоенергетичної радіографії можливо розрізнити матеріали окремих складових частин ОК за ефективним атомним номером.

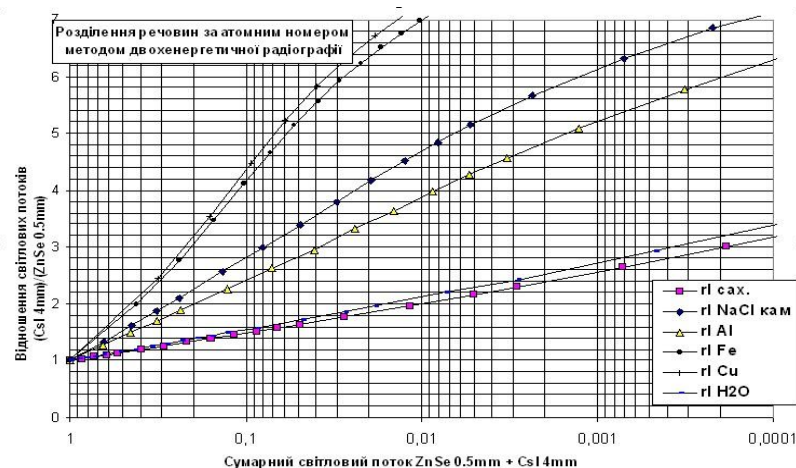


Рис. 3. Залежність відношення сигналів (ВД/НД) від сумарного сигналу (ВД+НД) для речовин з різними ефективними атомними номерами.

Для оцінки можливостей ЦРС з використанням двоенергетичного методу розділення речовин за ефективним атомним номером Z_{eff} було проведено дослідження з використанням графітової пластини товщиною 11мм ($Z_{\text{eff}}=6$) та п'яти алюмінієвих пластин ($Z_{\text{eff}}=13$) товщиною 1,5 мм кожна.

Програмне забезпечення (ПЗ) надає можливість візуалізації кольорового рентгенівського зображення на базі двох зображень, отриманих у двох різних енергетичних діапазонах.

Для покращення розділення «легких» речовин ($Z_{\text{eff}} < 13$) було проведено формування двоенергетичного зображення обраних ОК з використанням різної анодної напруги (70 та 140 кВ) та додаткової фільтрації (мідний фільтр 0,75мм при анодній напрузі 140кВ) – рис. 4.а).

Тоді, відклавши по осі абсцис значення НД+ВД, а по осі ординат значення ВД/НД за допомогою палітри ідентифікації (рис.4.в) отримаємо колір пікселя зображення.

За отриманими даними проведено аналіз середніх значень сигналів по окремих ділянках зображення у координатах ((ВД+НД),(ВД/НД)). З рис. 4.б), в) можна бачити, що в залежності від сумарного сигналу (ВД+НД), відношення (ВД/НД) характеризує Z_{eff} речовини ОК. Отримана інформація надає змогу відрізнити одну речовину від іншої за Z_{eff} .

Також, у якості ОК було обрано дві близькі за Z_{eff} речовини – вода (H₂O) з $Z_{\text{eff}} \approx 7.43$ та гліцерин (CH₂ОНСНОНСН₂ОН) з $Z_{\text{eff}} \approx 6.87$. Для дослідження залежності співвідношення ВД/НД від товщини ОК (характеризується ВД+НД) у якості тари для рідини було обрано поліетиленові пакетики невеликого розміру (рис.5). Така тара дозволяє

отримати радіографічне зображення без значного викривлення Z_{eff} матеріалів ОК.

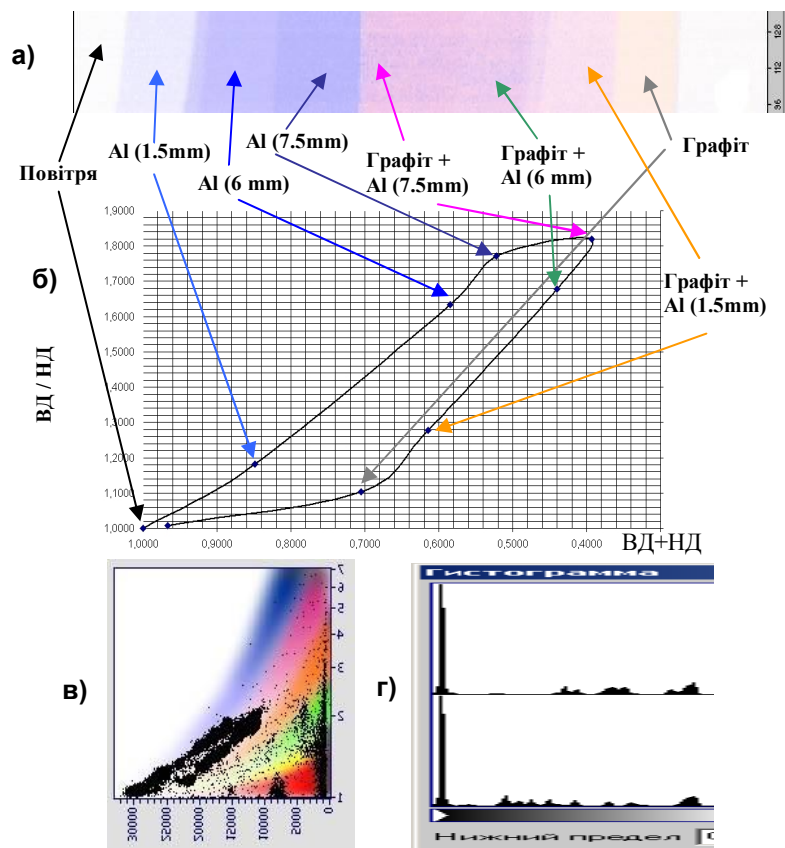


Рис. 4. Розділення алюмінію та графіту методом двоенергетичної радіографії. а) двоенергетичне зображення (графітова пластина товщиною 11мм та алюмінієві пластини товщиною по 1,5 мм кожна); б) середні значення сигналів за окремими ділянками зображення у координатах ((ВД+НД),(ВД/НД)); в) кольорова палітра ідентифікації; г) гістограма сигналів ВД та НД.

Для досягнення максимального рівня розділення речовин за Z_{eff} було отримано два тінювих рентгенівських зображення ОК з використанням різної анодної напруги (70 та 140 кВ).



Рис. 5. Зовнішній вигляд ОК - вода (H_2O) та гліцерин $Z_{\text{eff}} \approx 6.87$ (у поліетиленових пакетиках).

Рознесення енергій надало можливість впевнено розділити за Z_{eff} такі "легкі" речовини як вода та гліцерин. На рис. 6. наведено двоенергетичне цифрове радіографічне зображення води та гліцерину з використанням палітри ідентифікації, як описано вище. На палітрі можна бачити, що чорні крапки групуються у дві лінії, кожна з яких накладається на червоний або синій колір. Верхня лінія відповідає воді (більший Z_{eff}) а нижня гліцерину.

Таким чином, в ході експерименту встановлено, що можливим є розділення речовин за Z_{eff} навіть для органічних речовин з точністю $\approx 10\%$.

Подальше покращення розділення речовин може бути здійснено шляхом використання фільтрів рентгенівського випромінювання, більш точного калібрування сигналів детекторів, юстування взаємного розташування детекторів низьких та високих енергій, тощо.

Результати роботи можуть бути використані у інспекційних системах, анти-терористичного призначення, для технічної діагностики композитних матеріалів та медицини [6-14].

Подяка: ця робота була частково проведена за підтримки проекту NATO SfP-982823.

Список літератури: 1. *Frederick A. Morro*. Computed radiography: the future of radiographic inspection // 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma, Italy, 15-21 October 2000. 2. *H. Thiele, H.-J. Friemel*. Automatic wall thickness estimation on insulated pipes using digital radiography // 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma, Italy, 15-21 October 2000. 3. *M. Wevers, P. de Meester, R. Swennen*. Microfocus x-ray computer tomography in materials research // 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma, Italy, 15-21 October 2000. 4. *K. Bavendiek, U. Ewert, U. Zscherpel, W.D. Meade, U. Heike*. New Digital Radiography Procedure Exceeds Film Sensitivity Considerably in Aerospace Applications // 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 25-29 September, 2006., Abstract, V.2, p. 44. 5. *Б.В. Гриньов, В.Д. Рижиков, В.П. Семиноженко*. Сцинтиляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе. Киев «Наукова думка», 2007, 447 с. 6. *Ryzhikov, B. Grynyov, A. Opolonin, S. Naydenov, O. Lysetska, S. Galkin, E. Voronkin*. "Scintillation materials and detectors on their base for non-destructive two-energy testing" *Radiation Measurements*, №42, p. 915– 920 (2007) 7. *В.І. Щербаков, Г.І. Грездов* Електронні схеми на операційних підсилювачах. Київ "Техніка" 1983р. 8. *S.V. Naydenov, V.D. Ryzhikov, C.F. Smith*. Radiographic spectroscopy of composition of materials: a multi-energy approach // IEEE 2004, Nuclear Science Symposium, Abstracts, September 2004, Rome, Italy. 9. *S.V. Naydenov, V.D. Ryzhikov*, "Determining Chemical Compositions by Method of Multi-Energy Radiography", *Technical Physics Letters* 28, # 5, 357-360 (2002). 10. Детектирующая система для рентгеновской интроскопии. Патент № 2001053401 от 21.05.2001 11. Пат.1583806 СССР. Сканирующий интроскоп. - Оpubл.7.08.90, Бюл.№29 12. *B. Grinyov, V. Ryzhikov, P. Lecoq, S. Naydenov, A. Opolonin, E. Lisetskaya, S. Galkin, N. Shumeiko*. "Dual-energy radiography of bone tissues using ZnSe-based scintielectronic detectors" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* 571, p. 399–403 (2007) 13. <http://www.mxfttech.com/> 14. *Найденев С.В., Рижиков В.Д., Семиноженко В.П.* Мультиэнергетический подход в неразрушающем контроле функциональных материалов // Доклады НАНУ. - 2002.-№11.-с.95-100.

Поступила в редколлегию 13.04.11

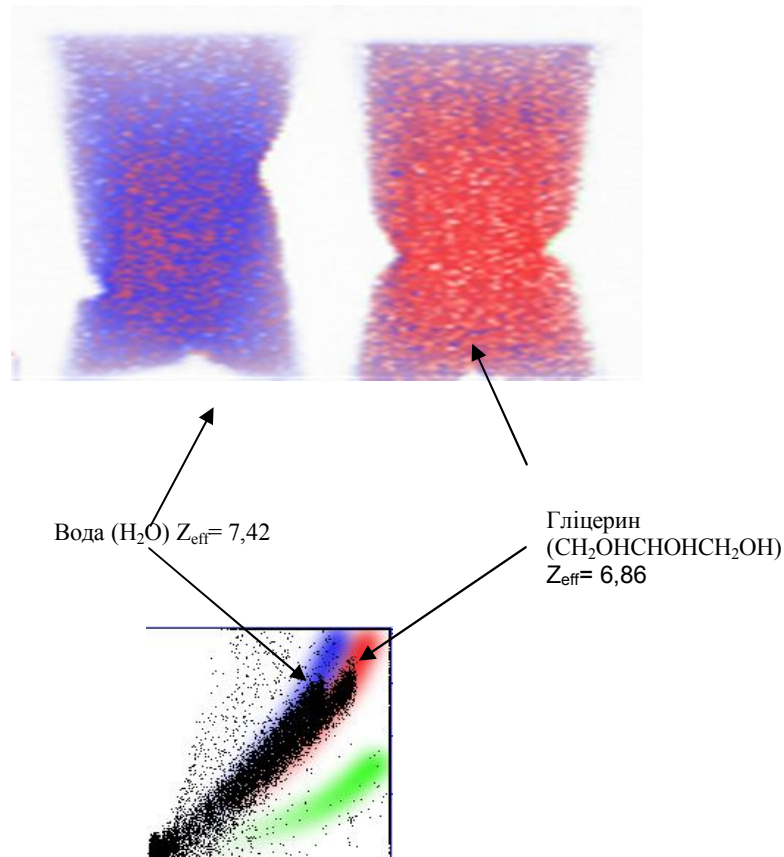


Рис. 6. Двохенергетичне цифрове радіографічне зображення "легких" речовин (вода та гліцерин) та палітра ідентифікації.

Висновки. Проведений експеримент з отримання двоенергетичного тіньового зображення об'єктів з ефективним атомним номером $Z_{\text{eff}} = 7,42$ та $Z_{\text{eff}} = 6,86$ підтвердив можливість розділення речовин за Z_{eff} з точністю $\approx 10\%$ та отримання додаткових даних про склад багатоконпонентних виробів при проведенні неруйнівного контролю.

Збільшення точності ідентифікації для митного догляду підвищує ймовірність своєчасного виявлення небезпечних та заборонених для перевезення речовин, а в неруйнівному контролі – відкриває нові можливості для технічної діагностики.