
СЕКЦИЯ № 3

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОГО АТОМНОГО НОМЕРА НЕОДНОРОДНОГО ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Ван Яньчжао

Научный руководитель: Удод В. А., профессор, д.т.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: wangyanzhao@tpu.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS METHODS FOR EVALUATING AN EFFECTIVE NUCLEAR NUMBER OF THE INHOMOGENEOUS TESTING OBJECT

Wang Yanzhao

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Udod V. A.

Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050

E-mail: wangyanzhao@tpu.ru

В статье представлены различные способы оценки эффективного атомного номера для материала неоднородного объекта контроля. Приведены сравнительные расчеты для некоторых материалов, из которых следует, что разница между значениями эффективных атомных номеров, вычисленных по различным формулам, для одних и тех веществ очень значительная. Наряду с этим исследована динамика поведения эффективного атомного номера в зависимости от максимальной энергии излучения, используемого для просвечивания контролируемого объекта.

The article presents various ways of estimating the effective atomic number for a material of a non-uniform testing object. Comparative calculations are made for some materials, from which it follows that the difference between the values of effective atomic numbers calculated by different formulas for the same substances is very significant. Along with this, the dynamics of the behavior of the effective atomic number is studied, depending on the maximum radiation energy used to scan the testing object.

1 Введение

Эффективный атомный номер Z_{eff} как характеристика многокомпонентных объектов позволяет получать более широкое представление о свойствах исследуемых материалов. Она широко используется в плотнометрии сложных по составу жидких и твердых сред, в медицине, в таможенном контроле и пр. [1–4]. Значение эффективного атомного номера многокомпонентного объекта соответствует массовому коэффициенту поглощения однокомпонентного материала, поглощение излучения в котором эквивалентно поглощению в данном многокомпонентном объекте [1].

В настоящее время в мировой научно-технической литературе приведено весьма большое количество формул для расчета эффективного атомного номера многокомпонентного объекта. Вследствие чего закономерно возникает задача проведения их сравнительного анализа, в частности, с учетом особенностей радиационного распознавания материалов методом дуальных энергий.

2 Обзор существующих способов оценки эффективного атомного номера

В [1] была предложена формула для расчета эффективного атомного номера на основе массового процента (ω_i)

$$Z_{eff1} = \sqrt[n]{\sum Z_i^n \omega_i}; \quad (1)$$

где ω_i - массовый процент i -го элемента. Параметр n варьируется в различных работах: 2,94 в [5], 3,1 в [6], 3 – 4 в [7].

В [3] авторы предложили следующее выражение для эффективного атомного номера:

$$Z_{eff2} = \left[\sum_i^N f_i Z_i^{3,8} \right]^{1/3,8}, \quad (2)$$

где $f_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i}$ – молекулярный процент элемента, входящего в образец; n_i – количество атомов i -го элемента.

В [4] представлена следующая совокупность формул для определения эффективного атомного номера:

$$Z_{eff3} = \left[\sum_i \alpha_i^e Z_i^{2,94} \right]^{1/2,94}, \quad (3)$$

где $\alpha_i^e = \frac{n_i Z_i}{\sum_i n_i Z_i}$ – процент электронов i -го элемента;

$$Z_{eff4} = \left[\frac{\sum_i \omega_i Z_i^4}{\sum_i \omega_i Z_i} \right]^{1/3}; \quad (4)$$

$$Z_{eff5} = \frac{\sum_i \frac{\omega_i Z_i}{A_i}}{\sum_i \frac{\omega_i}{A_i}}, \quad (5)$$

где A_i - атомная масса i -го элемента;

$$Z_{eff6} = \sum_i \omega_i Z_i. \quad (6)$$

В [8] авторы предложили выражение, в котором введен процент атомов (α_i^{at}):

$$Z_{eff7} = \left[\frac{\sum_i \alpha_i^{at} Z_i^3}{\sum_i \alpha_i^{at} Z_i} \right]^{1/2}; \quad \alpha_i^{at} = \frac{n_i}{\sum_i n_i}. \quad (7)$$

Затем в [9] авторы упростили предыдущее выражение и представили его в следующем виде:

$$Z_{eff8} = \sum_i \alpha_i^{at} Z_i. \quad (8)$$

В [10] эффективный атомный номер вычисляется по формуле:

$$Z_{eff9} = \sum_i n_{э_i} Z_i / n_{э}. \quad (9)$$

Здесь $n_9 = \sum_i n_{9i} = \sum_i \frac{N_A}{A_i} Z_i \omega_i$ – число электронов i -х атомов в 1 г вещества.

3 Результаты расчетов

По приведенным выше формулам нами были проведены соответствующие расчеты для некоторых веществ. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов Z_{eff} по формулам (1) – (9)

Материал	Хим. формула	Z_{eff1}	Z_{eff2}	Z_{eff3}	Z_{eff4}	Z_{eff5}	Z_{eff6}	Z_{eff7}	Z_{eff8}	Z_{eff9}
Полиэтилен	CH ₂	5,69	4,50	5,44	5,95	2,67	5,28	5,22	2,67	4,75
Вода	H ₂ O	7,68	5,99	7,42	7,96	3,33	7,22	7,17	3,33	6,60
Плексигас	C ₂ H ₈ O ₂	6,95	5,39	6,68	7,35	3,00	6,37	6,38	3,00	6,17
Целлюлоза	C ₆ H ₁₀ O ₅	7,03	5,99	6,89	7,30	4,10	6,68	6,70	4,10	6,54
Поливинилхлорид	C ₂ H ₃ Cl	14,17	10,71	13,86	15,86	5,33	12,00	12,93	5,33	13,82
TNT	C ₇ H ₅ N ₃ O ₆	7,11	6,61	7,06	7,27	5,31	6,92	6,96	5,52	7,14
ТЭН	C ₅ H ₈ N ₄ O ₁₂	7,44	6,85	7,38	7,58	5,40	7,26	7,29	5,59	7,31
Гексоген	C ₃ H ₆ N ₆ O ₆	7,28	6,69	7,21	7,41	4,86	7,11	7,12	5,43	7,09

Как видно из табл. 1 разница между значениями эффективных атомных номеров, вычисленных по различным формулам, для одних и тех веществ очень значительная. Между тем, судя по многочисленным публикациям, например [3, 6, 11], среди формул (1) – (9) наибольшее распространение имеет формула (1) с показателем степени n равным 2,94. Вследствие этого целесообразно использовать именно эту формулу для сравнения с другими формулами, предназначенными для определения эффективного атомного номера материала многокомпонентного объекта с учетом излучения.

4 Исследование динамики поведения Z_{eff} в зависимости от максимальной энергии излучения

В настоящее время для случая просвечивания многокомпонентного объекта немонотонным излучением наиболее распространен подход, согласно которому эффективный атомный номер объекта определяется как решение относительно Z уравнения вида [1, 2, 6]:

$$F_{nem}(Z) = \frac{\overline{m_{c1}(E)}}{\overline{m_{c2}(E)}}. \quad (10)$$

Здесь $\overline{m_{c1}(E)}$, $\overline{m_{c2}(E)}$ – средние массовые коэффициенты ослабления излучения для материала многокомпонентного объекта при его просвечивании рентгеновским излучением с низкой E_1 и высокой E_2 максимальными энергиями, соответственно;

$$F_{\text{нем}}(Z) = \frac{\overline{m_1(E, Z)}}{\overline{m_2(E, Z)}}, \quad (11)$$

где

$$\overline{m_1(E, Z)} = \int_0^{E_1} f_n(E, E_1) m(E, Z) dE; \quad (12)$$

$$\overline{m_2(E, Z)} = \int_0^{E_2} f_n(E, E_2) m(E, Z) dE \quad (13)$$

– средние массовые коэффициенты ослабления излучения для материала условного одноэлементного объекта при его просвечивании рентгеновским излучением с низкой E_1 и высокой E_2 максимальными энергиями, соответственно; $f_n(E, E_0)$ – нормированный (по площади на 1) энергетический спектр излучения, регистрируемого детектором, с максимальной энергией E_0 ; $m(E, Z)$ – массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения квантов с энергией E для материала условного одноэлементного объекта с атомным номером Z . Здесь вполне логично заметить, что значения МКО $m(E, Z)$ для фиксированной энергии E сначала находятся для целочисленных значений Z , а затем они распространяются и на дробные значения Z путем интерполяции.

Развернутые выражения для величин $\overline{m_{c1}(E)}$, $\overline{m_{c2}(E)}$ получаются по аналогии с (12), (13) и выглядят так:

$$\overline{m_{c1}(E)} = \int_0^{E_1} f_n(E, E_1) m_c(E) dE;$$

$$\overline{m_{c2}(E)} = \int_0^{E_2} f_n(E, E_2) m_c(E) dE,$$

где

$$m_c(E) = \sum_{i=1}^n \omega_i m(E, Z_i)$$

– МКО излучения квантов с энергией E для материала многокомпонентного объекта; n – количество элементов в многокомпонентном объекте; ω_i – массовая доля i -го элемента; $m(E, Z_i)$ – МКО излучения квантов с энергией E для материала i -го элемента с атомным номером Z_i , входящего в состав многокомпонентного объекта.

При использовании в системе контроля аналогового (средне токового) режима регистрации излучения нормированный энергетический спектр будет иметь согласно [12] следующий вид

$$f_n(E, E_0) = \frac{g(E, E_0) \varepsilon(E) \overline{E_n(E)}}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \varepsilon(E) \overline{E_n(E)} dE}.$$

Здесь $g(E, E_0) = \frac{dN}{dE}$ – энергетический спектр рентгеновского излучения, генерируемого источником, по числу квантов, $1/(\text{МэВ} \cdot \text{с})$; $\varepsilon(E)$ – счетная эффективность регистрации излучения детектором; $\overline{E_n(E)}$ –

среднее значение (математическое ожидание) поглощенной энергии для одного кванта с энергией E , испытавшего взаимодействие с детектором, МэВ.

В таблице 2 представлены эффективные атомные номера материалов некоторых многокомпонентных объектов, вычисленные по формулам (1) и (10) для максимальных энергий излучения 80 кэВ и 160 кэВ. При этом предполагалось, что в системе контроля применяются детекторы полного поглощения, т.е.

$$\varepsilon(E) = 1; \overline{E_{\text{п}}(E)} = E,$$

а энергетический спектр рентгеновского излучения, генерируемого источником, по числу квантов описывается выражением

$$g(E, E_0) = C \frac{E_0 - E}{E} e^{-m(E, Z_g)(\rho H)_g}.$$

Здесь $\frac{dI}{dE} = C(E_0 - E)$ – энергетический спектр интенсивности излучения, представленный в соответствии с [13] формулой Крамерса; C – некоторый постоянный коэффициент; $m(E, Z_g)$ – МКО излучения выходным окном рентгеновской трубки с массовой толщиной $(\rho H)_g$. Для определенности полагалось, что выходное окно рентгеновской трубки изготовлено из стекла толщиной 1,5 мм, а основной составляющей силикатного стекла является согласно [14] окись кремния SiO_2 .

Таблица 2. Эффективные атомные номера различных веществ, вычисленные по формулам (1) и (10) для максимальных энергий излучения $E_1 = 80$ кэВ и $E_2 = 160$ кэВ

Материал	Химическая формула	Z_{eff} по формуле (10)	Z_{eff} по формуле (1) при $n = 2,94$
Соль	NaCl	15,1645	15,17399
Вода	H ₂ O	7,48204	7,68426
Силикон	C ₂ H ₆ OSi	10,57183	10,64786
Карбонат железа	FeCO ₃	19,06965	20,48835
Дюралюминий	4,5%Cu+1,5%Mg+0,5%Mn+93,5%Al	14,45551	14,77588
Композит из углерода и железа	25%C+75%Fe	22,19942	23,6122
	50%C+50%Fe	19,19982	20,63248
	75%C+25%Fe	15,6081	16,44453

Как следует из таблицы 2 формула (10) обеспечивает, в целом, сравнительно хорошее совпадение по результатам с формулой (1). Между тем, в ряде случаев между этими же формулами наблюдается заметное рассогласование – различие в вычисленных эффективных атомных номерах более чем на 1,5. При досмотровом контроле погрешность в определении атомного номера материала контролируемого объекта более чем

на единицу может привести к пропуску системой контроля недозволенных вложений. Это обуславливает необходимость поиска новых подходов для более точного определения эффективных атомных номеров материалов многокомпонентных объектов при их просвечивании немонотонноэнергетическим излучением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков В.А. Массовый коэффициент поглощения и эффективный атомный номер многокомпонентного объекта для непрерывного спектра излучения // Контроль. Диагностика. - 2015. - № 6. - С. 34-40.
2. Park J.S., Kim J.K. Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system // Journal of the Korean physical society. – 2011. V. 59, - No. 4, - P. 2709-2713.
3. Alves H., Lima I., Lopes R.T. Methodology for attainment of density and effective atomic number through dual energy technique using microtomographic images // Applied Radiation and Isotopes. 2014. V. 89. - P. 6-12.
4. Anne Bonnin, Philippe Duvauchelle, Valérie Kaftandjian, Pascal Ponard. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2014. V. B318. - P. 223-231.
5. Spiers F. Effective atomic number and energy absorption in tissues // Br. J. Radiol. -1946. - No 19. - P. 52-63.
6. Heismann B.J., Leppert J., Stierstorfer K. Density and atomic number measurements with spectral X-ray attenuation method // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. - P. 2073-2079.
7. Hine G.J. Secondary electron emission and effective atomic numbers // Nucleonics. 1952. - No 1. - P. 9-15.
8. Manninen S., Koikkalainen S. Determination of the effective atomic number using elastic and inelastic scattering of gamma-rays // Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1984. V. 10. - No. 35. - P. 965–968.
9. Puumalainen P., Olkkonen H., Sikanen P. Assesment of fat content of liver by photon scattering technique // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. 1977. V. 28. - P. 785–787.
10. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений // Справочник. М., Энергоатомиздат. 1995. 496 с.
11. В.А. Горшков. Особенности двухэнергетической рентгеновской плотнометрии многокомпонентных объектов // Контроль. Диагностика. 2014, № 10, с. 25-30.
12. Осипов С.П., Удод В.А., Ван Я. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // Дефектоскопия.– 2017.–№ 8.– С. 35 – 56.
13. Рентгенотехника: Справочник. В 2 — х кн. Кн. 1. / В.В. Ключев. Ф.Р. Соснин, В. Аертс и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева. — 2 — е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 480 с.
14. Евстропьев К.С. Химия кремния и физическая химия силикатов. — М.: Промстройиздат, 1956, 124 с.