

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСМИССИОННОГО РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Рассмотрены вопросы трансмиссионного контроля тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Приведена методология расчета предельных систематических погрешностей контроля, решена задача оптимизации выбора источника излучения.

Работа выполнена в рамках программы сотрудничества Министерства образования Российской Федерации и Министерства Российской Федерации по атомной энергии по направлению "Научно-инновационное сотрудничество" 2002 г.

Продукция радиохимических производств, наряду с нефтью, газом и продуктами их переработки, становится одним из наиболее весомых компонентов, определяющих экономику Российской Федерации, по крайней мере, на Урале и в Сибири. Но для обеспечения безопасности атомных энергетических установок и конкурентоспособности выпускаемых российскими предприятиями тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) необходима разработка специализированных средств их контроля. Проблема состоит в том, что ТВЭЛ, предназначенный для использования в ядерных энергетических установках, представляет собой герметично упакованную в циркониевую трубку набор таблеток из уран-гадолиниевой смеси. С точки зрения переноса фотонного излучения все три элемента обладают существенно неодинаковыми свойствами: энергия K – края поглощения для урана составляет 115,6 кэВ, для гадолиния – 50,2 кэВ и циркония – 18 кэВ. ТВЭЛ необходимо контролировать в сборе, а соотношение уран-гадолиний измерять с минимально возможной погрешностью при технологических допусках на толщину стенки циркониевой оболочки. Поэтому включение такой работы в план исследований вызвано объективной необходимостью. Предпосылкой для её выполнения

могут служить нижеследующие рассуждения для более обобщенного случая, когда в условном трубопроводе находится двухкомпонентная смесь, причем по своим физическим характеристикам эти компоненты существенно отличаются.

На рис.1 приведена схема измерения ослабления излучения объектом контроля (ОК) в геометрии узкого пучка. ОК представляет собой цилиндр с толщиной стенки d и внутренним радиусом R . Начало оси x связано с геометрическим центром объекта контроля. Число частиц $I(x)$ (ток), зарегистрированных детектором за ОК в геометрии узкого пучка для моноэнергетического источника гамма-излучения, оценивается из выражения:

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu_T h_T(x) - \mu_1 h_1(x) - \mu_2 h_2(x)), \quad (1)$$

где I_0 – число частиц (ток), зарегистрированных детектором без объекта контроля при той же геометрии контроля и том же

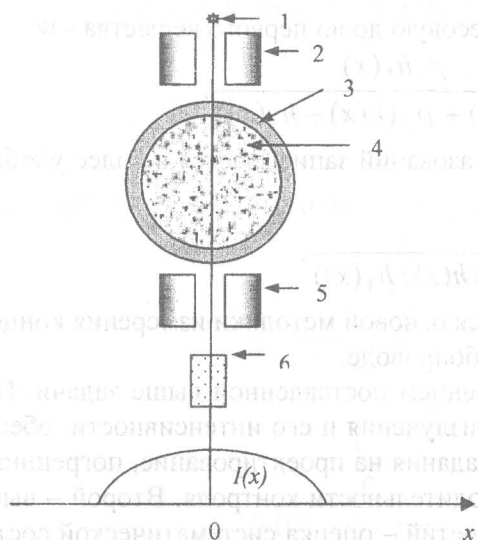


Рис.1. Схема измерения в геометрии узкого пучка: 1 – источник гамма-излучения; 2 – коллиматор источника гамма-излучения; 3 – трубопровод; 4 – смесь; 5 – коллиматор детектора; 6 – детектор

времени измерения; $h_T(x)$, $h_1(x)$, $h_2(x)$ - суммарная толщина стенок трубопровода в направлении просвечивания, интегральная толщина первого и второго компонента, соответственно; μ_T, μ_1, μ_2 - соответствующие линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения (ЛКО). Здесь порядок веществ чисто условное понятие, и выбор того или иного вещества смеси в качестве «первого» или «второго» определяется практической задачей. Толщины $h_T(x)$, $h_1(x)$, $h_2(x)$ находятся с помощью формул:

$$h_T(x) = \begin{cases} 2\sqrt{(R+d)^2 - x^2}, & R \leq x \leq R+d; \\ 2\left(\sqrt{(R+d)^2 - x^2} - \sqrt{R^2 - x^2}\right), & 0 \leq x \leq R; \end{cases}$$

$$h_1(x) = h(x) \cdot w_V;$$

$$h_2(x) = h(x) \cdot (1 - w_V);$$

$$h(x) = \begin{cases} 0, & R \leq x \leq R+d \\ 2\sqrt{R^2 - x^2}, & 0 \leq x \leq R, \end{cases}$$

где w_V - объемная доля первого вещества. Объемная доля w_V связана с весовой долей w соотношением:

$$w = \frac{w_V \rho_1}{w_V (\rho_1 - \rho_2) + \rho_2},$$

где ρ_1, ρ_2 - плотности первого и второго веществ смеси.

При известной толщине стенки трубопровода и заданном внутреннем диаметре линейная толщина первого вещества находится из выражения:

$$h_1(x) = \frac{-\ln(I(x)/I_0) - \mu_T h_T(x) - \mu_2 h(x)}{(\mu_1 - \mu_2)}. \quad (2)$$

С помощью формулы (2) можно оценить весовую долю первого вещества - w :

$$w = \frac{\rho_1 h_1(x)}{\rho_1 h_1(x) + \rho_2 (h(x) - h_1(x))}. \quad (3)$$

Формула (3) после незначительных преобразований записывается в более удобном для последующего анализа виде:

$$w = \frac{1}{1 - \rho_2 / \rho_1 + \rho_2 / \rho_1 (h(x) / h_1(x))}. \quad (4)$$

Выражение (4) в совокупности с (2) является основой методики измерения концентраций веществ двухкомпонентной смеси в трубопроводе.

Возникает ряд вопросов, связанных с решением поставленной выше задачи. Первый вопрос - выбор энергии источника гамма-излучения и его интенсивности, обеспечивающих заданную, на стадии технического задания на проектирование, погрешность измерения концентрации при заданной производительности контроля. Второй - выбор параметров геометрической схемы контроля. Третий - оценка систематической составляющей погрешности измерения концентрации, обусловленной отклонением технологических параметров объекта контроля и возможные пути уменьшения указанной погрешности. Геометрия контроля существенно влияет на его производительность.

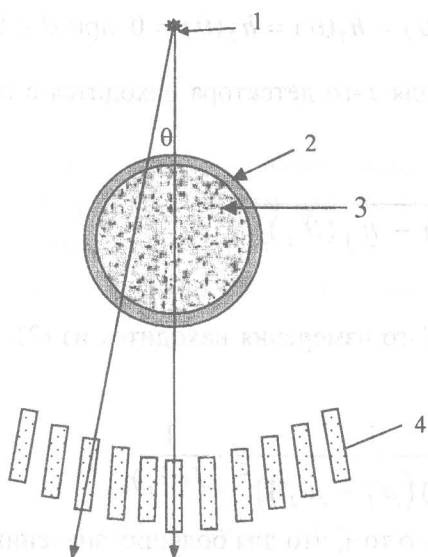


Рис. 2. Схема измерения в геометрии расходящегося пучка: 1 – источник гамма-излучения; 2 – трубопровод; 3 – смесь; 4 – линейка детекторов

На рис.2 приведена схема измерения ослабления гамма-излучения в геометрии расходящегося пучка. В задаче оценки соотношения концентраций двухкомпонентных смесей предполагается, что компоненты равномерно распределены по всему объему, по крайней мере, в части объема, вырезаемой телесным углом щелевой апертуры. Объект контроля сканируется щелевой апертурой. Размер апертуры a в направлении сканирования определяется на стадии технического задания на проектирование измерительного комплекса. Измерение усредненного значения объемной доли первого вещества w по всему объему осуществляется с помощью оценок концентрации, полученных для каждого детектора из линейки детекторов, попадающих в «зону интереса». Геометрическая схема контроля характеризуется следующими основными параметрами: расстоянием от источника гамма-излучения до объекта контроля - A ; угловым размером щели, в направлении, перпендикулярном направлению сканирования - от $-\hat{\theta}_1$ до $\hat{\theta}_1$:

$$\hat{\theta}_1 \geq \arcsin \left(\frac{R+d}{R+A+d} \right).$$

Линейка детекторов имеет форму дуги. Тогда число частиц (ток) I_i , регистрируемых i -м детектором находится интегрированием (1) по соответствующему телесному углу:

$$I_i = I_0 \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \exp(-\mu_T h_T(\theta) - (\mu_1 - \mu_2) h_1(\theta) - \mu_2 h(\theta)) d\theta, \quad (5)$$

где $h_T(\theta), h_1(\theta), h_2(\theta)$ находятся по формулам:

$$h_T(\theta) = \begin{cases} 2\sqrt{(R+d)^2 - ((R+A+d)\sin(\theta))^2}, & \hat{\theta}_2 \leq \theta \leq \hat{\theta}_1; \\ 2\sqrt{(R+d)^2 - ((R+A+d)\sin(\theta))^2} - \\ - 2\sqrt{R^2 - ((R+A+d)\sin(\theta))^2}, & 0 \leq \theta \leq \hat{\theta}_1; \end{cases} \quad (6)$$

$$h(\theta) = \begin{cases} 0, & \hat{\theta}_2 \leq \theta \leq \hat{\theta}_1; \\ 2\sqrt{R^2 - ((R+A+d)\sin(\theta))^2}, & 0 \leq \theta \leq \hat{\theta}_1; \end{cases} \quad (6)$$

$$h_1(\theta) = h(\theta)w_V;$$

$$h_2(\theta) = h(\theta)(1 - w_V).$$

где $\hat{\theta}_2 = \arcsin\left(\frac{R}{R+A+d}\right)$. Отметим, что $h_T(\theta) = h_1(\theta) = h_2(\theta) = 0$ при $\theta \geq \hat{\theta}_2$.

Оценка весовой доли первого вещества w_i для i -го детектора находится с помощью формулы, аналогичной (3):

$$w_i = \frac{\rho_1 h_1(\tilde{\theta}_i)}{\rho_1 h_1(\tilde{\theta}_i) + \rho_2 (h(\tilde{\theta}_i) - h_1(\tilde{\theta}_i))}, \quad (7)$$

где $\theta_i \leq \tilde{\theta}_i \leq \theta_{i+1}$.

Дисперсия $\sigma^2 w_i$ оценки концентрации для i -го измерения находится из (2), (7) с помощью разложения по малому параметру:

$$\sigma^2 w_i = \left(\frac{w}{w_v}\right)^4 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 \cdot \frac{1}{(h(\tilde{\theta}_i)(\mu_1 - \mu_2))^2} \cdot \frac{1}{I(\theta_i)}. \quad (8)$$

Из анализа формулы (8) можно сделать вывод о том, что для больших значений угла $\tilde{\theta}_i$, особенно близких к $\hat{\theta}_2$, относительная погрешность измерения концентрации при уменьшении апертуры детектора стремится к бесконечности.

В качестве конечной оценки концентрации первого вещества можно принять средневзвешенное значение концентрации $\bar{w}$:

$$\bar{w} = \frac{1}{n - i_0 + 1} \sum_{i=i_0}^n w_i, \quad (9)$$

где $i_0 > 1$. Усреднение в (9) производится по половине дуги, так как задача обладает осевой симметрией. Конкретное значение i_0 в формуле (9) подбирается исходя из соотношения значения апертуры детектора и возможных отклонений внутреннего и внешнего радиусов трубопровода, а также с учетом факта, изложенного выше. Заметим, что средневзвешенная оценка концентрации не является выборочным средним величины w , так как случайные величины w_i независимы и имеют разные дисперсии.

Дисперсия величины $\bar{w} - \sigma^2 \bar{w}$ равна

$$\sigma^2 \bar{w} = \frac{1}{(n - i_0 + 1)^2} \sum_{i=i_0}^n \sigma^2 w_i, \quad (10)$$

где $\sigma^2 w_i$ - дисперсии w_i . Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что средневзвешенная оценка не является оптимальной.

В качестве оценки w логично принять

$$\bar{\bar{w}} = \sum_{i=j_0}^n \alpha_i w_i, \quad \sum_{i=j_0}^n \alpha_i = 1. \quad (11)$$

Результаты промежуточных измерений концентрации ранжируются по информативности. Для реализации этого положения весовые коэффициенты α_i в формуле (11) подбираются таким образом, чтобы дисперсии оценок концентрации первого вещества уравнивались. Значение $j_0 < i_0$ определяется только исходя из возможных отклонений внутреннего и внешнего радиусов оболочки. В этом случае коэффициенты находятся следующим образом:

$$\alpha_i^2 = \frac{1}{\sigma^2 w_i \left(\sum_{j=j_0}^n (1/\sigma w_j) \right)^2}.$$

Указанная формула имеет чисто теоретический смысл, для применения ее на практике необходим алгоритм расчета весовых коэффициентов α_i по теоретическим, расчетным или полученным непосредственно в результате процесса измерений данным. Выражение для вычисления α_i имеет вид

$$\alpha_i^2 = \frac{h^2(\theta_i) I(\theta_i)}{\left(\sum_{j=j_0}^n \sqrt{h^2(\theta_j) I(\theta_j)} \right)^2}, \quad (12)$$

где $I(\theta_i)$ - число (ток) частиц, зарегистрированных i -м детектором.

Дисперсия оценки концентрации первого вещества в этом случае равна

$$\sigma^2 \bar{w} = \frac{G^2 (n - j_0 + 1)}{\left(\sum_{j=j_0}^n \sqrt{h^2(\theta_j) I(\theta_j)} \right)^2}, \quad G = \left(\frac{w}{w} \right)^2 \rho_2 / \rho_1 \cdot \frac{1}{\mu_1 - \mu_2}. \quad (13)$$

Для определения эффективности оценки (11) по сравнению с (9) был проведен ряд расчетов. Для корректности сравнения в процесс обработки включены детекторы, начиная с некоторого угла дуги $\theta_0 < \hat{\theta}_2$ (напомним, что линейка детекторов расположена по дуге окружности с радиусом, большим $R + A + d$), этому условию и замечаниям относительно отклонения геометрических параметров изделия, как правило, удовлетворяет угол $\theta_0 = \arcsin \left(\frac{R - d/2}{R + A + d} \right)$. Эффективность оценки применения формулы

(11) - η равна отношению дисперсий: $\eta = \sigma^2 \bar{w} / \sigma^2 \bar{w}$. Дисперсии вычислялись по формулам (8), (10), (13). Параметр η зависит от геометрических условий контроля, материалов смеси, диаметра и толщины стенок трубопровода энергии источника гамма-излучения. Провести полный анализ от всех перечисленных параметров не представляется возможным. В этом нет необходимости, достаточно продемонстрировать эффективность (11) на примере наиболее характерном для промышленности. В качестве примера рассмотрим объект контроля, представляющий из себя трубу внешним диаметром 7 мм из циркония с толщиной стенки 0,5 мм, смесь состоит из окиси урана (90%) и гадолиния. Для такого объекта контроля параметр η около 1,5. Для углов θ_0 , близких к θ_2 , эффективность формулы (11) существенно выше - $\eta \geq 2,8$.

Погрешность измерения концентрации гамма-абсорбционным способом существенно зависит от энергии гамма-излучения. В качестве целевой функции для выбора оптимальной энергии можно взять число частиц $N = n_0 T$, регистрируемых детектором без объекта контроля, и обеспечивающее заданную погрешность измерений концентрации первого вещества δ_0 :

$$n_0 T = \frac{\frac{w^2}{w_v^4} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{\delta_0^2 c (\mu_1 - \mu_2)^2}}{\left(\sum_{j=j_0}^n h(\theta_j) \sqrt{\exp(-\mu_T h_T(\theta_j) - \mu_1 h_1(\theta_j) - \mu_2 h_2(\theta_j))} \right)^2}. \quad (14)$$

Коэффициент C равен доле частиц, регистрируемых детектором без ОК от всего потока частиц, излучаемых источником гамма-излучения. Формула (14) выведена для изотропного источника и при условии, что детекторы эквивалентны друг другу и расположены на дуге, центр которой совпадает с центром источника гамма-излучения. Для анизотропного источника гамма-излучения или при другом расположении детекторов коэффициент C зависит от θ , поэтому должен будет внесен в формуле (8) под знак корня. Формула (14) позволяет оценить для заданной относительной погрешности измерения концентрации и заданной производительности необходимую активность источника гамма-излучения.

Очевидно, что существует энергия, минимизирующая число фотонов. Был проведен расчет оптимальной энергии для примера, рассмотренного выше. На рис.3 приведена зависимость $N(E)$. Зависимость имеет достаточно хорошо выраженный минимум. Для рассмотренного примера $E_{opt} = 380$ кэВ. Имеется конечное число источников гамма-излучения с энергетической линией, близкой к 380 кэВ. Источники должны иметь значительный период полураспада и большую удельную активность. Указанные параметры существенно влияют на потребительские свойства разрабатываемого комплекса для измерения концентрации двухкомпонентных смесей в трубопроводах. Удовлетворяют вышеперечисленным требованиям источники гамма-излучения: ^{22}Na , $E = 511$ кэВ, ^{125}Sb , $E = 428$ кэВ; ^{152}Eu , $E = 344$ кэВ. Отклонение от оптимального числа частиц, вызванное применением указанных линий составит от 5% для ^{125}Eu и до 30% для ^{22}Na .

На погрешность оценки концентрации влияют различные физические, технические и технологические факторы. К основным физическим факторам, ухудшающим точность измерения при использовании источников гамма-излучения с линейчатым спек-

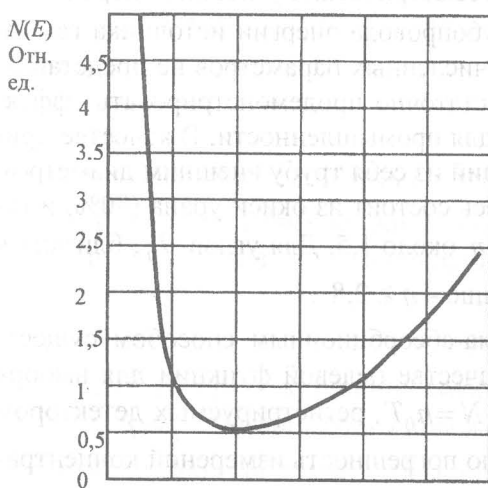


Рис.3. Зависимость $N(E)$: $h = 6$ мм
(90% $\text{UO}_3 + 10\% \text{Gd}$); $D = 0,5$ мм Zr

тром или источников рентгеновского излучения, следует отнести немонотонность и наличие в интегральном потоке регистрируемого излучения фотонов, рассеянных в объекте контроля. К техническим факторам относятся, например, «мертвое время» и энергетическое разрешение детектора. Роль указанных факторов сводится к минимуму применением дополнительных технических устройств и методических приемов. К технологическим факторам относятся допуски на технологические параметры объектов контроля. Систематические погрешности, вызванные отклонением значений параметров анализируемого изделия от идеальных значений, в силу своей неопределенности («случайности») практически не компенсируются калибровочными измерениями.

Оценим влияние отклонения технологических параметров изделия на величину систематической погрешности оценки w . Значение абсолютной систематической погрешности оценки концентрации $\Delta_1 w$, вызванное отклонением толщины оболочки Δd , находится с помощью разложения (7), (11), (12) по малому приращению. Внутренний диаметр трубопровода остается неизменным. Формула будет иметь значительно более сложный вид, чем для плоскопараллельного изделия, так как отклонения приводят к изменению не только текущих значений концентрации первого вещества, но и весовых коэффициентов α_i в формуле (11). В результате анализа формулы (12) удалось установить, что отклонения значений α_i от идеальных имеют порядок $(\Delta d)^2$. То есть этим отклонением в α_i можно пренебречь.

Для каждого детектора изменение толщины стенки трубопровода приводит к изменению $\Delta h_T(\theta_i)$. С учетом вышеизложенного, величина абсолютной систематической погрешности измерения w , обусловленная изменением толщины стенки трубопровода Δd , оценивается следующим образом:

$$\Delta w = \left(\frac{\mu_T}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \frac{w^2}{w_V^2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot \frac{\frac{\partial h_T}{\partial d}(\theta_i)}{h(\theta_i)} \right) \Delta d = p(E) \Delta d. \quad (15)$$

Сомножитель при Δd - $p(E)$ интерпретируется как коэффициент «усиления» (ослабления) погрешности. Размерность $p(E)$ - (1/см). Из анализа формулы (15) можно сделать вывод, что значение Δw пропорционально отношению плотностей второго и первого веществ смеси и пропорционально отношению ЛКО гамма-излучения для материала трубопровода к разности линейных коэффициентов ослабления для первого и второго веществ смеси. Указанный вывод означает, что зависимость Δw от энергии существенно зависит от того, из какого материала изготовлен трубопровод и какие вещества находятся в исследуемой смеси. На рис.4 приведены результаты расчетов $p(E)$ для того же примера, что и выше. Функция $p(E)$ является возрастающей для энергий, больших 115,6 кэВ (K -край поглощения урана). Для энергий от 300 до 511 кэВ коэффициент $p(E)$ меньше 0,5. Это означает, что при отклонении толщины циркониевой оболочки на 0,01 см (2%) абсолютная систематическая погрешность оценки концентрации окиси урана будет не больше 0,005. Указанный факт объясняется небольшим значением отношения ЛКО гамма-излучения для материала оболочки к разности линейных коэффициентов ослабления для окиси урана и гадолиния. Для других, практически значимых задач, коэффициент «усиления» погрешности может быть очень большим. Так, например, при измерении концентрации углеводородного сырья в смеси с водой в трубопроводе из железа, влияние погрешности, обусловленной толщиной стенки трубопровода существенно больше. Для подобных задач нет необходимости в сканировании заполненного трубопровода, поэтому уменьшение систематической погрешности измерения концентрации достигается точным измерением толщины трубопровода в заданном месте.

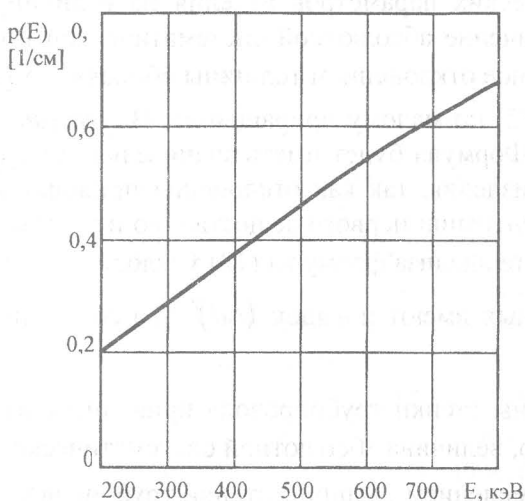


Рис.4. Зависимость $p(E)$: $h = 6$ мм
(90% UO_3 + 10% Gd); $D = 0.5$ мм

На точность измерения концентрации влияет также изменение вещественного состава составляющих смеси. В данном случае под изменением вещественного состава составляющих следует понимать «чистоту» этих составляющих, то есть долю посторонних примесей. Наличие посторонних примесей в первом и втором веществе смеси приводит к отклонению соответствующих ЛКО гамма-излучения и, следовательно, к появлению систематической погрешности измерения концентрации. Значение абсолютной систематической погрешности оценки концентрации $\Delta_2 w$, вызванное отклонением ЛКО первого вещества $\Delta\mu_1$, также находится с помощью разложения (7), (11), (12) по малому приращению. Для весо-

вых коэффициентов α_i можно сделать выводы, аналогичные предыдущим.

Величина абсолютной систематической погрешности измерения w , обусловленная отклонением ЛКО первого вещества $\Delta\mu_1$, оценивается следующим образом

$$\Delta_2 w = \frac{w^2}{w_v^2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Delta\mu_1}{\mu_1 - \mu_2} \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{h_1(\theta_i)}{h(\theta_i)}. \quad (16)$$

Сумма в (16) есть не что иное, как оценка объемной концентрации первого вещества. Поэтому формула (16) примет вид

$$\Delta w = \frac{w^2}{w_v} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\Delta\mu_1}{\mu_1 - \mu_2}. \quad (17)$$

Из анализа формулы (17) можно сделать вывод, что значение $\Delta_2 w$ пропорционально отношению плотностей второго и первого веществ смеси и обратно пропорционально разности линейных коэффициентов ослабления для первого и второго веществ смеси. Отклонение $\Delta\mu_1 = (\mu_n - \mu_1)\Delta\tilde{w}$, где $\mu_n, \Delta\tilde{w}$ - ЛКО примеси и отклонение весовой доли первого вещества, вызванное наличием примеси. Очевидно, что для примесей с

близким атомным номером и близкой плотностью отношение $\frac{\Delta\mu_1}{\mu_1 - \mu_2}$ близко к 1. Дру-

гой случай - $\mu_n = 0$, то есть наличие пор (микропор). Параметр $\Delta\tilde{w}$ в этом случае будет характеризовать пористость первого вещества. Формула (17) примет вид

$$\Delta w = \frac{w^2}{w_v} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{-\mu_1}{\mu_1 - \mu_2} \Delta\tilde{w}. \quad (18)$$

Из (18) следует, что наличие пор занижает оценку концентрации. Для рассмотренного выше примера коэффициент «усиления» погрешности, вызванной наличием пор в первом веществе смеси примерно равен -0,65. С учетом вышеизложенного можно рекомендовать для рассматриваемого примера к применению источник гамма-излучения ^{152}Eu , $E = 344$ кэВ.

Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при разработке и создании гамма-абсорбционных комплексов контроля относительного содержания компонентов уран-гадолиниевой смеси в производстве тепловыделяющих элементов для нужд атомной энергетики.

Б.И. КАПРАНОВ, О.А. СИДУЛЕНКО, В.В. ВАРГА, Х. БАУМБАХ,
В.А. МАКЛАШЕВСКИЙ, В.Н. ФИЛИНОВ.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ЗАТУХАНИЯ В КОМПТОНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Одним из основных мешающих факторов в реконструкции изображения внутренней структуры объектов в комптоновской томографии является ослабление первичных и рассеянных пучков в предыдущих слоях. Анализ коррекции влияния поглощения посвящены работы многих авторов [1-6]. Однако практическая полезность этих исследований ограничена оторванностью рассматриваемых физических моделей от реальности. Основной недостаток известных работ – это неучет разнородности контролируемого изделия по сечению и использование прошедшего излучения для коррекции затухания в предыдущих слоях. В статье приведены результаты анализа возможностей итерационного метода коррекции затухания, а также описан метод физической коррекции затухания первичного пучка за счет применения двух источников с разной энергией.

В комптоновской томографии информацию о плотности материала в данном элементе объема несет поток однократно рассеянных квантов, вышедших из этого объема и попавших в детектор. В статье описаны разработанные в НИИ ИН ТПУ методы интегральной коррекции затухания, основанные на итерационной процедуре коррекции измеряемых данных и на основе использования двух источников излучения с разными энергиями.

1. Метод послойной коррекции

Элемент объема контролируемого объекта, в пределах которого плотность практически не изменяется, называют элобом. То есть рассматриваемая ситуация соответствует случаю, когда размеры РО не превышают размеры элоба [1-6].

Рассмотрим схему сканирования рис. 1. Узкий пучок гамма-излучения от точечного источника S с эффективной энергией E (поз. 1) формируется коллиматором (поз. 2) и падает на контролируемый объект.

Рассеянное в элементе объема материала (поз.3) на угол θ_s излучение, проходя через коллиматор (поз. 5), попадает на детектор (поз. 4).

Коллиматоры представляют собой каналы с площадью поперечного сечения S_s и S_d соответственно и длинами каналов h_s и h_d .

Осуществляя пошаговое двухкоор-

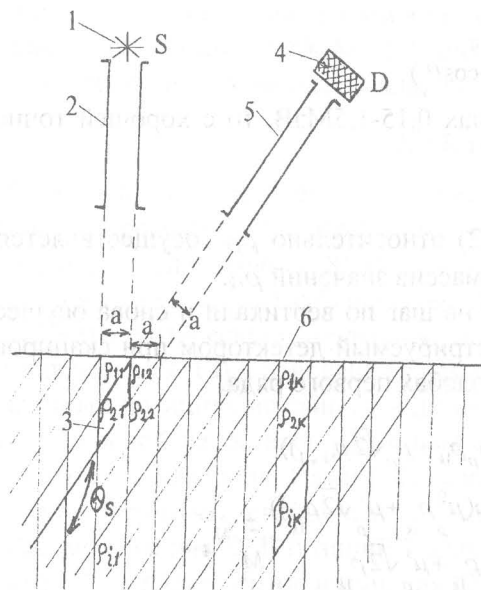


Рис. 1. Геометрия поточечного сканирования