

УДК 53.088.22: [539.1.074.3:678.746.2]

Б.В. Гринев, Н.Р. Гурджян, О.В. Зеленская, В.Р. Любинский,
Л.И. Мицай, Н.И. Молчанова, В.А. Тарасов

Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, Украина

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРАХ

Приведена оценка неопределенности результатов измерений технической длины ослабления света (TAL) длинномерных пластмассовых сцинтилляторов (ПС). Определены границы погрешности и неопределенности измерений TAL для ПС цилиндрической формы длиной 100 см. Показано, что оба подхода оценки качества детекторов дают сопоставимые результаты. Сделан вывод, что такие же границы относительной погрешности и неопределенности измерений ожидаемы для цилиндрических ПС других размеров.

Ключевые слова: сцинтиллятор, детектор, техническая длина ослабления света, неопределенность измерений.

Введение

Введение в Украине европейских стандартов предъявляет повышенные требования к качеству измерения параметров поставляемой продукции. В институте сцинтилляционных материалов национальной Академии наук Украины (ИСМА НАН Украины) на основе пластмассовых сцинтилляторов (ПС) разрабатываются и производятся сцинтилляционные детекторы различной конфигурации, которые используются для решения научных и технических задач во многих странах. Значительную часть продукции составляют крупногабаритные, в частности длинномерные (длиной до нескольких метров), детекторы на основе ПС. Они используются для контроля больших объектов и для высокочувствительной регистрации ионизирующего излучения (ИИ).

Пример использования в промышленности цилиндрических детекторов, длиной не более чем 200 см, показан на рис. 1 [1].

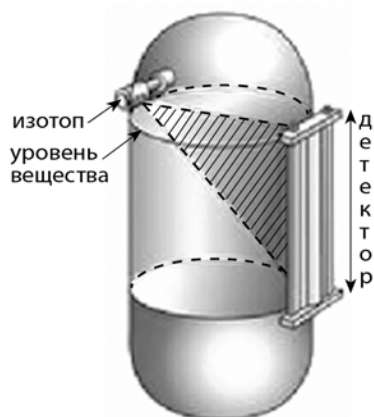


Рис. 1. Применение радиоизотопного метода для определения уровня (плотности) вещества в емкости [1]

Гамма-излучение, испускаемое изотопом, поглощается при распространении через емкость, на-

полненную веществом, и регистрируется детектором. Поглощение излучения и сигнал детектора зависят от уровня вещества в емкости.

Под действием ИИ в сцинтилляторе рождается свет, интенсивность которого пропорциональна энергии, поглощенной в сцинтилляторе. На пути к фотоприемнику часть света теряется. Доля потерянного света определяется качеством материала сцинтиллятора, а также качеством обработки его поверхности.

В нормативных документах [2] качество детектора характеризуют прозрачностью к сцинтиллятора к собственному излучению. За рубежом для характеристики качества длинномерных детекторов чаще используют величину, обратную прозрачности - TAL (Technical Attenuation Length) [3] - техническую длину ослабления света, имеющую обозначение λ .

С 1993 г., времени разработки «Руководства по выражению неопределенности измерений» [4], параллельно используются два подхода к оценке параметров точности измерений. Они тесно связаны между собой количественно, но отличаются тем, к какой величине относят дисперсию, характеризующую разброс наблюдаемых значений: к истинному значению наблюдаемой величины (традиционный подход, погрешность) или к результату измерений (новый подход, неопределенность) [5].

Целью данной работы является оценка результатов измерений технической длины ослабления света (TAL) в цилиндрических ПС с использованием обоих подходов.

Изложение основного материала

1. Описание объекта измерения

В настоящей работе описан метод определения качества длинномерных цилиндрических ПС. Для измерений были выбраны три полированных цилиндра диаметром 4,83 см и длиной 100 см, изготовленные из ПС марки UPS 923A.

Внешний вид исследуемого сцинтиллятора и установка для измерения TAL показаны на рис. 2.

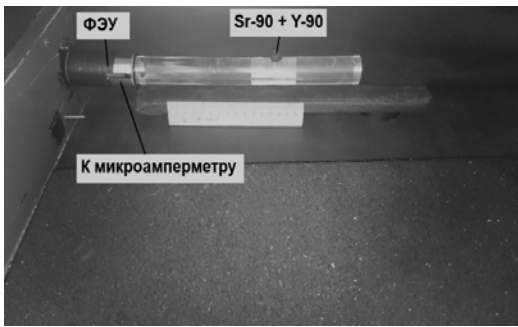


Рис. 2. Установка для измерения TAL длинномерных сцинтилляторов

2. Определение TAL в цилиндрических детекторах на основе ПС

В соответствии со стандартом [6], для измерений была использована установка с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) типа R1307. Измерения проводились в условиях кондиционирования помещения для сохранения постоянного температурного режима, а также с применением систем стабилизации питания ФЭУ, что позволило пренебречь влиянием нестабильности результатов измерений, связанных с длительной работой установки.

Метод определения TAL основан на методе 1 измерения k , описанном в стандарте [2]. В настоящее время, данный метод является частью технических условий (ТУ) [7]. Суть его заключается в измерении зависимости величины анодного тока I , мкА, ФЭУ от координаты x , см, расположения источника Sr-90+Y-90, перемещаемого вдоль оси детектора, на расстояния от 30 см до 70 см от фотокатода ФЭУ с интервалом 10 см.

Полученную экспериментальную кривую поглощения света $I(x)$ обрабатывали в соответствии со стандартом [2] и ТУ [7].

3. Физические основы метода получения и обработки результатов измерений

Прохождение светом пути l через среду с прозрачностью k описывается законом Бугера – Ламберта [8]:

$$J = J_0 \exp(-kl), \tag{1}$$

где J_0 и J – интенсивности падающего и прошедшего потоков света.

Учитывая, что в нашем случае ток I пропорционален интенсивности потока света, координата источника излучения x соответствует пути света l до фотокатода ФЭУ, а λ – величина, обратная k , получаем следующее выражение:

$$I = I_0 \exp(-x / \lambda). \tag{2}$$

Уравнение (2) описывает экспериментальную зависимость. Из него следует физический смысл λ :

это расстояние, на котором величина светового потока падает в e раз.

Для определения численного значения λ уравнение (2) логарифмируют, получая выражение:

$$\ln I = \ln I_0 - x / \lambda, \tag{3}$$

а затем, применяя линейную аппроксимацию, приводят к виду:

$$\ln I = bx + g, \tag{4}$$

где b – угловой коэффициент аппроксимирующей прямой, $g = \ln I_0$ – отсечка по оси ординат.

Уравнение (4) представляет собой математическую модель, позволяющую вычислить значение λ , равное $1/|b|$.

4. Оценка погрешности и неопределенности результата измерений TAL

С целью оценки погрешности и неопределенности измерений λ для каждого из трех исследуемых цилиндров были многократно ($m = 3$) измерены величины анодного тока I_i для разных положений ($n = 5$) источника x_i . В соответствии с [9] для каждого положения источника x_i вычислялись средние из трех измерений значения тока $\bar{I}_i(x)$ и их логарифмы $\ln \bar{I}_i(x)$. Полученная логарифмическая зависимость средних значений была аппроксимирована с использованием метода наименьших квадратов (МНК) общей линейной зависимостью вида:

$$\ln \tilde{I}(x) = \ln \tilde{I}_0 + \tilde{b}x. \tag{5}$$

Результаты измерений для цилиндра № 2 представлены на рис. 3. Суммарное количество измерений для каждого образца составило $N = 15$.

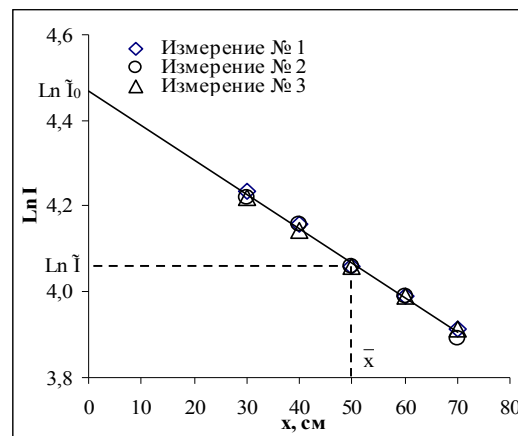


Рис. 3. Зависимости $\ln I(x)$ и аппроксимирующая прямая для цилиндра №2

Для вычисления величин оценок погрешности и неопределенности измерений TAL функция $\tilde{\lambda}$ была выражена из уравнения (5), с учетом зависимости $\tilde{\lambda} = 1/|b|$:

$$\tilde{\lambda} = \frac{x}{\ln \tilde{I}_0 - \ln \tilde{I}(x)}. \tag{6}$$

Численные значения величин \tilde{b} , $\text{Ln}\tilde{I}_0$, $\text{Ln}\tilde{I}$ и $\tilde{\lambda}$, представлены в табл. 1.

Таблица 1

TAL для исследуемых цилиндров длиной 100 см

| Цилиндр | \tilde{b} , см ⁻¹ | $\text{Ln}\tilde{I}_0$ | $\text{Ln}\tilde{I}$ (x = 50 см) | $\tilde{\lambda}$, см |
|---------|--------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| 1 | 0,01254 | 4,44 | 3,82 | 80 |
| 2 | 0,00803 | 4,47 | 4,07 | 125 |
| 3 | 0,00621 | 4,31 | 4,00 | 161 |

При оценке погрешности и неопределенности измерений TAL исходили из предположения о нормальном законе распределения возможных значений измеряемой величины с доверительной вероятностью, равной $P_d = 0,95$. Влияние статистического разброса результатов многократных измерений зависимости $\text{Ln}\tilde{I}_i(x)$, при вычислении погрешности измерений $\tilde{\lambda}$, оценивалось путем определения среднеквадратического отклонения (СКО) углового коэффициента - $S(\tilde{b})$, СКО TAL - $S(\tilde{\lambda})$ и доверительных границ случайной погрешности результата измерений TAL - $\varepsilon(\tilde{\lambda})$. Вычислялись абсолютные и относительные значения указанных величин.

Численное абсолютное значение величины $S(\tilde{b})$, см⁻¹, определялось применяя [9] из выражения:

$$S(\tilde{b}) = \sqrt{\frac{m \sum_{i=1}^n (\text{Ln}\tilde{I}(x) - \text{Ln}\tilde{I}_0)^2 + \sum_{i=1}^n (\text{Ln}\tilde{I}(x) - \text{Ln}\tilde{I}(x))^2}{(N-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (7)$$

Численное абсолютное значение $S(\tilde{\lambda})$, см, вычислялось в соответствии с [10], как погрешность функции $1/|\tilde{b}|$, и равнялось $S(\tilde{b})/\tilde{b}^2$.

При вычислении доверительных границ случайной погрешности измерения TAL коэффициент Стьюдента находили из таблиц для $P_d=0,95$ и числа степеней свободы, равного $N-2$ [10].

При оценке неисключенной систематической погрешности измерения TAL в качестве выборочных дисперсий переменных x_i , I_i и I_0 использовали погрешности приборов. Пределы чувствительности шкалы микроамперметра $\Delta I = \Delta I_0$ и измерительной линейки Δx , в соответствии с [10], составляли 0,5 деления шкалы.

Численное относительное значение неисключенной систематической погрешности определения $\tilde{\lambda}$ - $\Theta(\tilde{\lambda})$, % вычисляли через частные производные функции λ (6) по переменным I_0 , I , x [11] для средней точки интервала ($x = 50$ см) аппроксимированной прямой из выражения:

$$\Theta(\tilde{\lambda}) = 1.1 \times \sqrt{\frac{\Delta I_0^2}{\tilde{I}_0^2 (\text{Ln}\tilde{I}_0 - \text{Ln}\tilde{I})^2} + \frac{\Delta I^2}{\tilde{I}^2 (\text{Ln}\tilde{I}_0 - \text{Ln}\tilde{I})^2} + \frac{\Delta x^2}{\bar{x}^2}} \quad (8)$$

Доверительные границы погрешности результата измерений $\Delta\tilde{\lambda}$ рассчитывались в соответствии с [12]. Далее, в соответствии с руководством [4], рассчитывались абсолютные и относительные значения неопределенности измерений TAL: по типу А - $u_A(\tilde{\lambda})$, по типу В - $u_B(\tilde{\lambda})$, суммарной - $U_c(\tilde{\lambda})$ и расширенной - $U_p(\tilde{\lambda})$. Полученные результаты измерений представлены в табл. 2.

Соотношение вкладов показателей неопределенности измерений TAL для цилиндра №2 представлено на рис 4.

Таблица 2

Показатели погрешности и неопределенности измерения TAL для цилиндров длиной 100 см

| Номер цилиндра | $\tilde{\lambda}$, см | $S(\tilde{\lambda})$ | $\varepsilon(\tilde{\lambda})$ | $\Theta(\tilde{\lambda})$ | $\Delta\tilde{\lambda}$ | | $u_A(\tilde{\lambda})$ | $u_B(\tilde{\lambda})$ | $u_c(\tilde{\lambda})$ | $U_p(\tilde{\lambda})$ | |
|----------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|
| | | Отн., % | Отн., % | Отн., % | Абс., см | Отн., % | Отн., % | Отн., % | Отн., % | Абс., см | Отн., % |
| 1 | 80 | 4,81 | 10,39 | 2,45 | 9 | 10,7 | 4,81 | 1,29 | 4,98 | 8 | 10,0 |
| 2 | 125 | 3,41 | 7,36 | 3,03 | 10 | 8,0 | 3,41 | 1,59 | 3,76 | 9 | 7,5 |
| 3 | 161 | 4,03 | 8,72 | 4,16 | 16 | 9,7 | 4,03 | 2,18 | 4,59 | 15 | 9,2 |

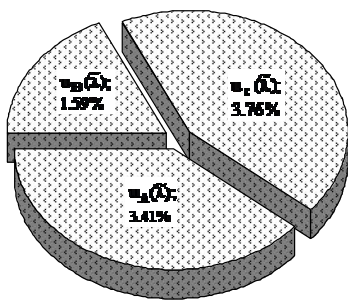


Рис. 4. Вклады показателей неопределенности измерений TAL для цилиндра №2

Абсолютные значения погрешности и неопределенности для исследуемых цилиндров представлены на рис. 5.

Выводы

Предложена методика оценки неопределенности результатов измерений TAL в длинномерных цилиндрических ПС-детекторах.

Определены границы погрешности и неопределенности результатов измерений TAL для цилиндров длиной 100 см.

Численные значения границ находятся в пределах 10 % независимо от качества цилиндров.



Рис. 5. Показатели погрешности и неопределенности измерений TAL в цилиндрах

Проведенная оценка качества результатов измерений TAL с использованием двух подходов дает сопоставимые результаты.

Большой вклад случайной погрешности свидетельствует о наличии неконтролируемых случайных факторов, и требует дополнительного изучения при дальнейшей работе.

Описанная методика оценивания неопределенности результатов измерений TAL может быть применена к длинномерным детекторам другой формы.

Список литературы

- Berthold Technologies Measurement Systems, Bad Wildbad, Germany.
- ГОСТ 17038.7-79 Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Методы измерений сцинтилляционных параметров.
- Bicron Organic Scintillators, Related materials and Detectors. – Sant-Gobain, 1997. – P. 15.
- ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43-2001, IDT).
- Володарский Е.Т. Особенности оценивания неопределенности результатов некоторых экспериментальных процедур / Е.Т. Володарский, Л.А. Кошечкина // Украинский метрологический журнал. – 2011. – № 2. – С. 5-12.
- ГОСТ 17038.3-79 Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Методы измерений сцинтилляционных параметров.
- ТУ У 26.6 – 23756522 – 068:2015 Сцинтилляторы пластмассовые цилиндрической и прямоугольной формы на основе полистирола.
- Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 555 с.
- Фаддеев М.А. Элементарная обработка результатов эксперимента / М.А. Фаддеев. – Нижний Новгород: ННГУ, 2010. – 122 с.
- Кассандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 104 с.
- Лукьянов В.Б. и др. Радиоактивные индикаторы в химии / В.Б. Лукьянов и др. – М.: Высш. шк., 1977. – 280 с.
- Отчет по теме НИР «Разработка методов и метрологическое обеспечение контроля качества упакованных сцинтилляционных кристаллов». – Институт монокристаллов. – Харьков, 1980. – 118 с.

Поступила в редколлегию 2.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ОСЛАБЛЕННЯ СВІТЛА У ЦИЛІНДРИЧНИХ СЦИНТИЛЯТОРАХ

Б.В. Гриньов, Н.Р. Гурджян, О.В. Зеленська, В.Р. Любинський, Л.І. Міцай, Н.І. Молчанова, В.О. Тарасов

Проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання технічної довжини ослаблення світла (TAL) довгомірних пластмасових сцинтиляторів (ПС). Визначені межі похибки та невизначеності вимірювання TAL для ПС циліндричної форми довжиною 100 см. Показано, що обидва підходи до оцінки якості детекторів дають порівняні результати. Зроблено висновок, що ті ж межі відносної похибки та невизначеності вимірювань очікуються для циліндричних ПС інших розмірів.

Ключові слова: сцинтилятор, детектор, технічна довжина ослаблення світла, невизначеність вимірювання.

LIGHT ATTENUATION MEASUREMENTS UNCERTAINTY ESTIMATION IN CYLINDRICAL SCINTILLATORS

B.V. Grynyov, N.R. Gurdzhian, O.V. Zelenskaya, V.R. Lyubynskiy, L.I. Mitcay, N.I. Molchanova, V.A. Tarasov

The measurement estimation uncertainty of technical attenuation length (TAL) in lengthy plastic scintillators (PS) is set out. Error and uncertainty limits for TAL in cylindrical 100 cm length PS are determined. It is shown, that both approaches to detectors quality estimation lead to comparable results. The conclusion is made, that the same relative error and uncertainty measurement limits are expected for another sizes cylindrical PS.

Keywords: scintillator, detector, technical attenuation length, measurements uncertainty.