

ВЛИЯНИЕ НЕОДИМА НА ДЛИНУ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА В ЖИДКОМ ОРГАНИЧЕСКОМ СЦИНТИЛЛЯТОРЕ

*И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович*¹

Институт ядерных исследований РАН, Москва

С помощью оптической ячейки длиной 1 м измерено влияние концентрации неодима на длину ослабления света водного и органического растворов. В качестве источника фотонов использовался эмиссионный спектр сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) размером $\varnothing 25 \times 25$ мм, облучаемый γ -квантами от источника Cs-137. Фотоны регистрировались с помощью ФЭУ Hamamatsu R878. Аппроксимация двумя экспонентами была использована для расчета длины ослабления фотонов в воде (Nd 7,5 г/л, 15 г/л) и линейном алкилбензоле (ЛАБ) (Nd 4,7 г/л). Для концентрации Nd в ЛАБ 4,7 г/л длина ослабления света составила $L_{Nd} = (1,95 \pm 0,14)$ м.

The influence of a neodymium concentration on the attenuation length of aqueous and organic solutions has been measured with a 1 m optical cell. The scintillation crystal of NaI(Tl) with dimensions $\varnothing 25 \times 25$ mm, irradiated by gamma rays of Cs-137, was used as a source of emission photon spectra. The photons were detected by photomultiplier Hamamatsu R878. The two-exponential fitting was applied for the calculation of the attenuation length of photons in water (Nd 7.5 g/l, 15 g/l) and linear alkylbenzene (LAB) (Nd 4.7 g/l). It is found that for the Nd concentration in LAB 4.7 g/l the attenuation length is $L_{Nd} = (1.95 \pm 0.14)$ m.

PACS: 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Жидкий низкофоновый органический сцинтиллятор в настоящее время является одним из лучших инструментов для регистрации редких событий. В частности, он может быть использован для поиска двойного безнейтринного β -распада на неодиме-150. Для этого соединение, содержащее этот изотоп, должно быть растворено в достаточном количестве органического растворителя и не оказывать большого влияния на такие важные характеристики сцинтиллятора, как световыход и прозрачность. Влияние концентрации неодима на световыход сцинтиллятора было исследовано авторами в работе [1]. В данной работе наше внимание было сосредоточено на изучении прозрачности сцинтиллятора в зависимости от концентрации неодима. В случае неодима задача осложняется тем, что ион неодима имеет линии поглощения в широкой области спектра, и простые методы измерения длины ослабления света оказываются непригодными.

¹E-mail: yanovich@inr.ru

Длина ослабления света (прозрачность) является важным параметром в экспериментах с использованием жидких органических сцинтилляторов, когда требуется хорошее энергетическое разрешение. Длина ослабления света в среде определяется как расстояние, на котором число фотонов уменьшается в e раз. Для сферической геометрии детектора основным источником потерь фотонов является их поглощение, рассеяние (Rayleigh, Mie) меняет только их траекторию.

Потеря света в жидкой среде описывается законом Ламберта–Бера:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = l/L,$$

где L — длина ослабления параллельного монохроматического пучка света для данной среды; I_0 — исходный поток фотонов; I — поток фотонов на расстоянии l . Параметр L зависит от сечения поглощения фотонов молекулами для данной длины волны (коэффициент молярной экстинкции ϵ) и их концентрации.

Для несферической конфигурации детектора вклад в потери фотонов дает также рассеяние света. Выбор растворителя, тип и концентрация растворенного элемента во многом определяют оптические характеристики жидкого органического сцинтиллятора.

Существует два наиболее распространенных способа оценки длины ослабления света в жидкости [2–8]. 1. Измерение спектра поглощения света в ультрафиолетовой и видимой области в диапазоне 300–600 нм с помощью UV-VIS спектрофотометра в кварцевых кюветах длиной 10 см. 2. Измерение ослабления интенсивности света на специально сконструированных ячейках (горизонтальные или вертикальные) длиной 1 м и более.

Наиболее часто длинные ячейки применяют для жидкостей с высокой прозрачностью ($L > 20$ м), когда требуется уменьшить погрешность в вычислении длины ослабления. В этом случае в качестве источника фотонов часто используются коллимированные светодиоды с фиксированной длиной волны в диапазоне от 360 до 450 нм. Для проб жидкого сцинтиллятора (с введенными в растворитель сцинтилляционными добавками) исследуемая спектральная область ограничивается и начинается в большинстве случаев с $\lambda > 400$ нм. Это ограничение связано с высоким сечением поглощения фотонов добавками POPOP, bis-MSB и др. в более короткой области. В этом случае для определения длины ослабления света можно использовать метод, основанный на сканировании сцинтилляционной ячейки по ее длине радиоактивным γ -источником, например Cs-137 [9].

В планируемом эксперименте по поиску безнейтринного двойного β -распада на ядре Nd-150 важно исследовать влияние концентрации растворенного неодима на оптические характеристики жидкого органического сцинтиллятора. Длина ослабления света Nd-содержащего раствора во многом будет определять состав сцинтиллятора, а также конструкцию и размеры детектора.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Измерение длины ослабления света на спектрофотометре. Ограничение на точность вычисления длины ослабления света в случае использования спектрофотометра связано с погрешностью в измерении поглощения ΔA . Для UV-VIS Perkin-Elmer Lambda 35 $\Delta A = \pm 0,003$ (440 нм), что ограничивает диапазон вычислений $L \sim 15$ м.

Неодим имеет линии поглощения, которые попадают в область квантовой чувствительности фотоумножителей, что уменьшает эффективность регистрации фотонов в сцинтилляторе. Линии поглощения Nd присутствуют в широком диапазоне ультрафиолетового и видимого спектра. Относительно более прозрачная область находится в интервале 350–500 нм. Для длин волн больше 500 нм имеет место сильное поглощение фотонов неодимом.

При создании Nd-содержащего жидкого сцинтилляционного детектора важно оптимизировать концентрацию растворенного неодима, концентрацию и тип сцинтилляционных добавок (эмиссионный спектр фотонов), спектральную и квантовую чувствительность фотоприемника. Спектр поглощения водного раствора неодима, измеренный в 1-см кварцевой кювете на UV/VIS спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 35 в диапазоне 220–500 нм, изображен на рис. 1.

Там же на вставке изображена кривая квантовой чувствительности фотокатода (SBA, типа 440К) ФЭУ. В случае использования соединения неодима недостаточной чистоты возможно присутствие примесей других редкоземельных элементов, таких как празеодим Pr с линией поглощения 440,4 нм, которая также находится в области спектральной чувствительности фотоумножителей.

Влияние концентрации неодима на спектр поглощения фотонов в области 350–500 нм, в которую попадают эмиссионные спектры сцинтилляционных добавок PPO, bis-MSB, можно видеть на рис. 2. На нем приведены спектры поглощения света водным раствором NdCl_3 с концентрациями по неодиму 5,1 и 52,6 г/л. Измерения были сделаны в 10-см кварцевой кювете. Из спектров поглощения по формуле Ламберта–Бера были рассчитаны длины ослабления света в зависимости от длины волны, которые показаны на вставке рис. 2. Из рис. 2 видно, что есть несколько относительно прозрачных окон в спектральной области от 350 до 500 нм с различной длиной ослабления света для двух концентраций неодима.

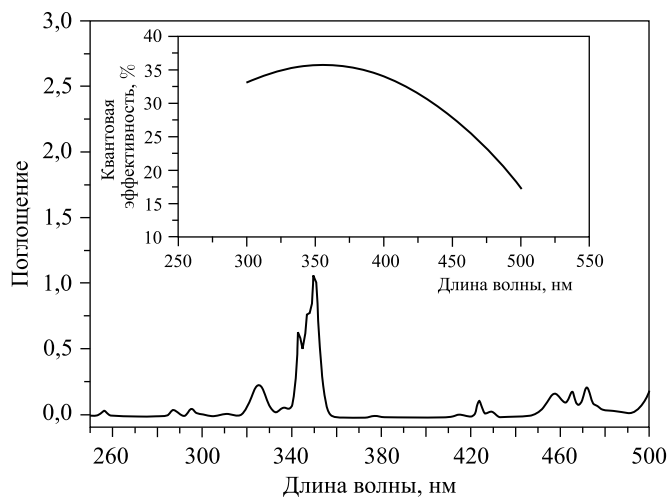


Рис. 1. Спектр поглощения водного раствора NdCl_3 (х. ч.) ($C_{\text{Nd}} = 52,6$ г/л), измеренный в 1-см кювете. Вставка — квантовая чувствительность фотокатода (SBA)

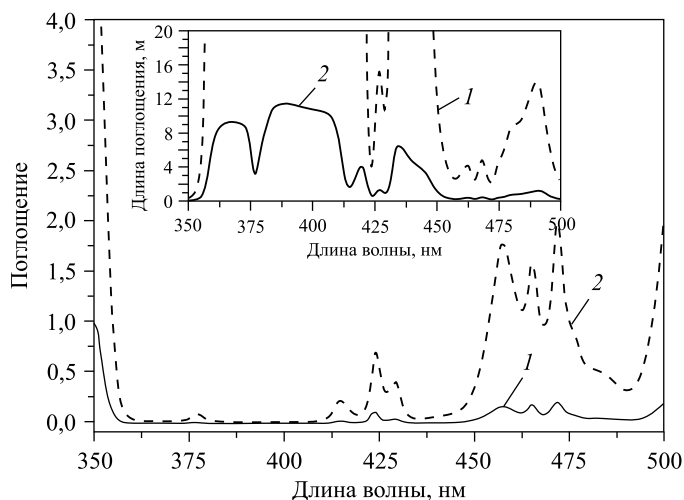


Рис. 2. Спектры поглощения водного раствора NdCl_3 . 1 — $C_{\text{Nd}} = 5,1$ г/л; 2 — $C_{\text{Nd}} = 52,6$ г/л. Вставка — длина ослабления (м): 1 — $C_{\text{Nd}} = 5,1$ г/л; 2 — $C_{\text{Nd}} = 52,6$ г/л

Для введения неодима в состав жидкого органического сцинтиллятора в большинстве случаев используются соединения неодима с карбоновыми кислотами, такими как 2-метилвалериановая (MVA) или 1,3,5-триметилгексановая (ТМНА). Подходят также координационно-насыщенные комплексы с β -дикетонатами. Эти соединения позволяют достичь хорошей растворимости Nd в таких растворителях, как псевдокумол и ЛАБ (линейный алкилбензол).

Образующиеся комплексные соединения неодима будут вносить свой вклад в общее поглощение фотонов в ультрафиолетовой области спектра.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА НА КОЛОНКЕ ДЛИНОЙ 1 м

Для оценки влияния концентрации неодима на эффективную длину ослабления света в условиях, когда расстояние, с которого собирают фотоны, достаточно большое и приближается к размерам реальных детекторов, был собран оптический модуль длиной 1 м. Модуль состоял из цилиндрической колонки и ФЭУ, его принципиальная схема изображена на рис. 3.

Вертикально расположенная колонка — это труба длиной 1 м из прозрачного оргстекла (полиметилметакрилата) с внутренним диаметром \varnothing 40 мм и толщиной стенки 5 мм. К нижнему торцу трубы приклеен диск из оргстекла толщиной 5 мм, к которому через оптическую смазку прикреплен ФЭУ Hamamatsu R878, 2". Объем жидкости, заливаемый в колонку, составляет 1250 мл. Для увеличения эффективности светосбора наружная стенка трубы обернута зеркальной отражающей пленкой (алюминизированным майларом). Чтобы исключить возможность попадания внешнего рассеянного света, оптический модуль размещен внутри светонепроницаемого цилиндрического бокса из черного полиэтилена. Во время измерений сигнал с ФЭУ поступал на предусилитель (PRA model 1763), затем спектрометрический усилитель (ORTEC 571) и плату амплитудного анали-

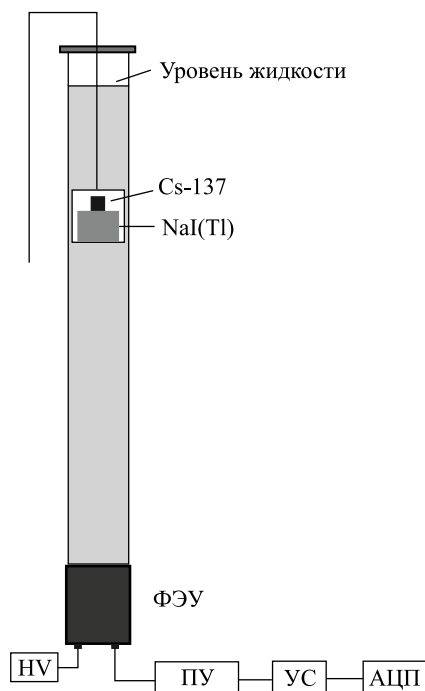


Рис. 3. Оптический модуль для измерения прозрачности. ПУ — предусилитель; УС — усилитель; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

светодиодами, что позволяет иметь более стабильный источник эмиссионного спектра. Высокий световыход кристалла (~ 40000 фотонов/МэВ) дает возможность проводить измерения на больших расстояниях, когда ампула с NaI(Tl) удалена от ФЭУ на ~ 1 м.

Похожая методика была использована в работе [10], в которой источник фотонов в виде тонкого слоя жидкого сцинтиллятора, возбуждаемый ультрафиолетовым светом, находился на дне конструкции, а ФЭУ перемещался по высоте трубы.

В данной конструкции кристалл NaI(Tl) перемещался вдоль трубы с помощью нейлоновой нити, привязанной к верхней крышке ампулы и выходящей наружу через отверстие в верхней части колонки. Фиксация нити позволяла локализовать источник фотонов на разной высоте относительно ФЭУ. Погрешность в точности измерения положения ампулы по высоте трубы ± 1 мм. Расстояние между последовательными точками измерений составляло 10 см. Несколько экспериментов было выполнено с шагом 5 см.

Первые измерения были сделаны с пустой трубкой, заполненной воздухом. Изменение интенсивности фотонов в зависимости от расстояния определялось по смещению регистрируемого пика поглощения 662 кэВ (Cs-137) в кристалле NaI(Tl). Время набора спектра для каждой точки зависело от положения источника по высоте трубы и составляло 10–15 мин, чтобы обеспечить статистику не менее 1000 импульсов в максимуме. Разрешение (FWHM) под пиком 662 кэВ ухудшалось по мере увеличения расстояния между кристаллом и ФЭУ. Так, например, для дистиллированной воды, которая использовалась

затра импульсов АЦП-8К-В2 (АСПЕКТ). Цель измерений: получить зависимость величины амплитуды импульса от расстояния между источником фотонов и фотоумножителем, чтобы затем определить длину ослабления света в жидкости.

В качестве источника фотонов был применен сцинтилляционный неорганический кристалл NaI(Tl) размером $\varnothing 25 \times 25$ мм, который вместе с радиоактивным изотопом Cs-137 размещался внутри герметичной цилиндрической ампулы диаметром $\varnothing 30$ мм и высотой 40 мм, изготовленной из нержавеющей стали. Гамма-кванты 662 кэВ от распада Cs-137 попадали на кристалл NaI(Tl), который давал спектр эмиссионных фотонов. Эмиссионные фотоны от кристалла через прозрачное дно ампулы, выполненное из оргстекла (толщиной 4 мм), проходили в нижний объем жидкости. Хороший оптический контакт между кристаллом NaI(Tl) и окном обеспечивал тонкий слой минерального масла на дне ампулы.

Непрерывный эмиссионный спектр фотонов NaI(Tl) находится в интервале 320–600 нм, с максимумом излучения 415 нм. Спектр от NaI(Tl) близок к эмиссионному спектру большинства органических сцинтилляторов. Кроме того, интенсивность фотонов (световыход) NaI(Tl) не так сильно зависит от температуры по сравнению со

в качестве эталона, разрешение для нижней и верхней точки расположения кристалла в трубе составляло 8,5 и 14 % соответственно. Выбранное рабочее высокое напряжение питания ФЭУ обеспечивало линейную зависимость амплитуды сигнала на шкале АЦП во всем диапазоне измерений. Для проверки стабильности полученных результатов была проведена серия повторных измерений с залитой в трубу жидкостью. Основная погрешность вызвана флуктуацией положения пика поглощения 662 кэВ, которая возможна из-за нестабильности высоковольтного питания ФЭУ и системы усиления. Серия повторных измерений, в которых кристалл NaI(Tl) как источник фотонов несколько раз перемещался по высоте трубы, показала, что изменение положения пика поглощения для каждой точки не превышало 0,5 %. Чтобы стабилизировать рабочие характеристики фотумножителя, за час до начала измерений на делитель ФЭУ подавалось высоковольтное питание. Собранный конструкцией оптического модуля позволяла перемещать источник фотонов по высоте трубы при включенном высоком напряжении на ФЭУ, что уменьшало погрешность и сокращало время эксперимента. Результат, полученный для первой точки, когда кристалл NaI(Tl) находился на дне трубы, использовался для нормировки значений, измеренных на других расстояниях от ФЭУ.

Основные эксперименты на оптическом модуле были проведены с деионизированной водой (сопротивление 18 МОм), ЛАБ, а также водными и органическими растворами неодима. Вода и ЛАБ служили в качестве растворителей солей неодима. На рис. 4 для сравнения приведены результаты измерений для пустой колонки, колонки, заполненной водой, и ЛАБ.

Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы с помощью уравнения вида

$$y(x) = k_1 \exp\left(-\frac{x}{L_1}\right) + k_2 \exp\left(-\frac{x}{L_2}\right),$$

где первая экспонента с показателем L_1 отражает вклад геометрического фактора на уменьшение числа фотонов на малых расстояниях. Вторая экспонента с параметром L_2 использовалась для вычисления длины ослабления света в жидкости. Разные значения параметра L_1 для трех сред связаны с отличающимися величинами коэффициента пре-

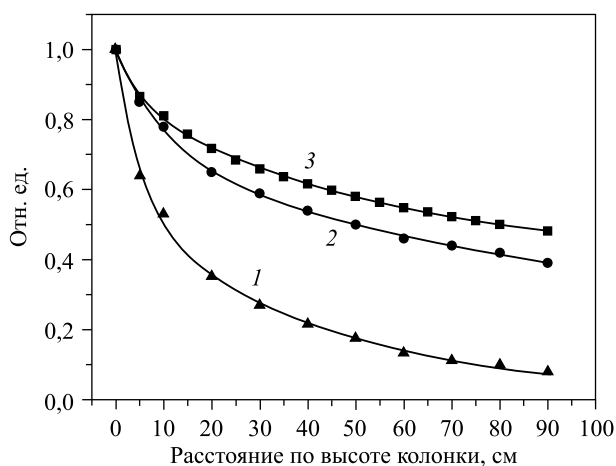


Рис. 4. Результаты измерений для колонки длиной 1 м. ▲, 1 — воздух; ●, 2 — вода; ■, 3 — ЛАБ

ломления на границе оргстекла (1,49) с воздухом (1,0), водой (1,33) и ЛАБ (1,48) для эмиссионного спектра фотонов, выходящего из контейнера с кристаллом NaI(Tl). Вычисленные значения L_2 для воды и ЛАБ составили:

вода — $(164,1 \pm 13,2)$ см,

ЛАБ — $(154,6 \pm 9,5)$ см.

Таким образом, в пределах погрешностей значения L_2 для воды и ЛАБ на длине 1 м совпадают. Длина ослабления света, которая была определена из спектра поглощения пробы ЛАБ на спектрофотометре UV-VIS, дала значение $L \sim 15$ м на длине волны 420 нм. Для дистиллированной воды, у которой сопротивление $> 17,5$ МОм·см, прозрачность в ультрафиолетовой области ≥ 50 м [11]. Наблюдаемое отличие результатов для ЛАБ и воды, полученных с кристаллом NaI(Tl) на колонке длиной 1 м, объясняется тем, что источник фотонов неколлимированный и часть света теряется, выходя наружу через боковые стенки трубы.

Результаты, полученные для воды и ЛАБ, были использованы для сравнительного анализа влияния неодима на длину ослабления фотонов в водных и органических Nd-содержащих растворах. Водный раствор содержал неодим в виде растворенной соли NdCl_3 , а органический — $\text{Nd}(\text{ТМНА})_3$ (ТМНА — триметилгексаноат) в ЛАБ. На рис. 5 приведены результаты измерений для концентраций неодима 7,5 и 15 г/л в воде. Данные нормированы на значения, полученные для дистиллированной воды.

Во вставке рис. 5 в качестве примера изображены амплитудные спектры от γ -квантов 662 кэВ в кристалле NaI(Tl), полученные на расстояниях 0 и 70 см от ФЭУ. Видны пики полного поглощения в кристалле, которые использовались для построения кривой уменьшения числа фотонов в трубе с водой.

Нормировка на данные, полученные с водой, позволила анализировать поглощение фотонов только ионами неодима. Когда источник фотонов (кристалл NaI(Tl)/Cs-137) находится на дне трубы (координата $x = 0$), интенсивность фотонов (пик полного по-

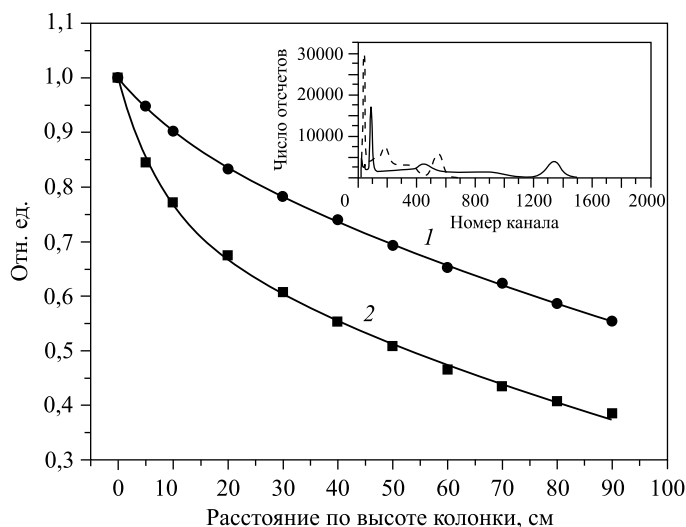


Рис. 5. Влияние неодима на ослабление фотонов в воде: ●, 1 — Nd, 7,5 г/л; ■, 2 — Nd, 15 г/л. Вставка: амплитудный спектр γ -квантов 662 кэВ в NaI(Tl) для двух расстояний (0 и 70 см)

глошения) практически не зависит от концентрации неодима в воде. Экспериментальные данные для концентраций Nd 7,5 и 15 г/л были аппроксимированы суммой двух экспонент:

$$y(x) = k_1 \exp\left(-\frac{x}{L_1}\right) + k_2 \exp\left(-\frac{x}{L_2}\right),$$

где $y = I_{\text{Nd}}/I_{\text{H}_2\text{O}}$, $1/L_1 = 1/L_{\text{Nd}(1)} - 1/L_{\text{H}_2\text{O}(1)}$, $1/L_2 = 1/L_{\text{Nd}(2)} - 1/L_{\text{H}_2\text{O}(2)}$. I_{Nd} , $I_{\text{H}_2\text{O}}$ — интенсивность фотонов в растворе неодима и чистой воды, а L_{Nd} , $L_{\text{H}_2\text{O}}$ — длина ослабления фотонов растворами неодима и воды соответственно. Параметр $1/L = 1/L_{\text{Nd}} - 1/L_{\text{H}_2\text{O}}$ отражает влияние растворенного неодима на прозрачность жидкости.

На полученных графиках видны две характерные области изменения интенсивности фотонов от расстояния. Первая экспонента наиболее сильно отражает поглощение света ионами неодима. Коэффициент k_1 в два раза больше для кривой Nd 15 г/л ($k_1 = 0,16$) по сравнению с Nd 7,5 г/л ($k_1 = 0,08$). Параметр $1/L_1$ первой экспоненты для концентраций Nd 7,5 и 15 г/л равен соответственно 0,087 и 0,11 см⁻¹. Вторая область, которая начинается с расстояния ~ 40 см, не столь сильно зависит от концентрации растворенного неодима (линии идут приблизительно параллельно), и параметр $1/L_2$ для большей концентрации отличается только на 5 %.

После водных растворов неодима аналогичные измерения в 1-м трубе были проведены с Nd- и Gd-содержащими соединениями в ЛАБ. ЛАБ в настоящее время является одним из наиболее перспективных растворителей органических сцинтилляторов, который применяется при создании крупномасштабных детекторов, предназначенных для детектирования редких нейтринных событий. Измерения с гадолиний-содержащей солью Gd(ТМНА)₃ в ЛАБ были сделаны для сравнения, так как у ионов Gd в отличие от неодима нет линий поглощения в интересующей нас области. Существует пик поглощения Gd на длине 272,8 нм с коэффициентом экстинкции $\varepsilon = 4,2$ л/моль·см, который не влияет на результаты измерений. После измерений с чистым ЛАБ были проведены эксперименты с растворами органических солей Gd и Nd в ЛАБ. Чистый ЛАБ, как и в случае с дистиллированной водой, служил в качестве стандарта. Концентрации Nd и Gd в ЛАБ были соответственно 4,7 и 5,5 г/л. Результаты измерений изображены на рис. 6.

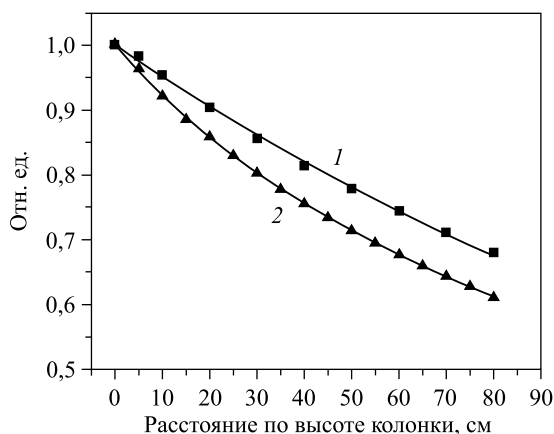


Рис. 6. Кривые поглощения фотонов для Gd(ТМНА)₃ (1) и Nd(ТМНА)₃ (2) в ЛАБ. ■, 1 — $C_{\text{Gd}} = 5,5$ г/л; ▲, 2 — $C_{\text{Nd}} = 4,7$ г/л

Данные для Nd и Gd нормированы на значения, полученные для чистого ЛАБ. Кривая 1 рис. 6 для Gd хорошо аппроксимируется экспонентой вида

$$\left(\frac{I_{\text{Gd}}}{I_{\text{ЛАБ}}} \right) = \exp \left(-\frac{x}{L} \right),$$

где $1/L = (1/L_{\text{Gd}} - 1/L_{\text{ЛАБ}})$.

Вычисленный фактор $1/L$ равен $0,00487 \text{ см}^{-1}$, что для прозрачности ЛАБ 15 м дает усредненную длину ослабления света для Gd-содержащего раствора ЛАБ $L_{\text{Gd}} = 1,8 \text{ м}$. Основной причиной потери фотонов является растворенный комплекс гадолиния. Полученная нормированная зависимость для гадолиния в ЛАБ может быть описана законом Ламберта–Бера.

Для аппроксимации Nd в ЛАБ было использовано уравнение (1), где $y = I_{\text{Nd}}/I_{\text{ЛАБ}}$, $1/L_1 = 1/L_{\text{Nd}(1)} - 1/L_{\text{ЛАБ}(1)}$, $1/L_2 = 1/L_{\text{Nd}(2)} - 1/L_{\text{ЛАБ}(2)}$.

Коэффициенты k_1 и $1/L_1$ первой экспоненты, как и в случае водных растворов, отображают влияние неодима на поглощение фотонов. Коэффициент $1/L_2 = 0,00445 \text{ см}^{-1}$ во второй экспоненте близок к значению $1/L$ для раствора Gd в ЛАБ, что видно из наклона двух прямых. Исходя из того, что прозрачность ЛАБ, измеренная на спектрофотометре, равна 15 м, используя $1/L_2$, можно оценить длину ослабления света в Nd-содержащем органическом растворе. Для концентрации Nd в ЛАБ 4,7 г/л длина ослабления света составила $L_{\text{Nd}} = (1,95 \pm 0,14) \text{ м}$. Этот результат находится в близком согласии со значением $L_{\text{NdLS}} = (2,16 \pm 0,12) \text{ м}$ [11], которое было получено для Nd-содержащего сцинтиллятора (Nd 6,5 г/л, PPO 1,5 г/л, bis MSB 30 мг/л) на основе псевдокумола. Измерения длины ослабления в Nd-сцинтиляторе были проведены с помощью другой методики, которая использовала внешний коллимированный γ -источник Cs-137 для сканирования вдоль оптической кварцевой ячейки длиной 1 м.

Близость результатов длины ослабления света для Gd/Nd-содержащих органических растворов позволяет предположить, что на больших расстояниях собственное поглощение иона неодима не оказывает существенного влияния. Основным поглотителем фотонов в металлсодержащих сцинтилляторах будут являться растворенные комплексы металла (Nd или Gd), которые поглощают в УФ-области, и их спектр перекрывается с областью чувствительности ФЭУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использована методика измерения прозрачности Nd-содержащих жидких растворов в ячейке длиной 1 м с помощью неорганического сцинтилляционного кристалла NaI(Tl).

Эмиссионный спектр NaI(Tl), который получался от облучения γ -квантами (Cs-137), близок к большинству эмиссионных спектров жидких органических сцинтилляторов. Большая величина Z и высокий световыход NaI(Tl) позволили использовать пик полного поглощения (662 кэВ) для анализа ослабления света.

Для вычисления длины ослабления света в пробах жидкости была измерена зависимость интенсивности фотонов (пик поглощения) от расстояния между кристаллом NaI(Tl) и ФЭУ. Для оценки влияния неодима на прозрачность раствора результаты измерений были нормированы на значения, полученные для дистиллированной воды и ЛАБ.

Величина длины ослабления света, полученная для раствора неодима (Nd 4,7 г/л) в ЛАБ, $L_{Nd} = (1,95 \pm 0,14)$ м, согласуется со значением, вычисленным для сцинтиллятора на основе РС (Nd 6,5 г/л, PPO 1,5 г/л, bis MSB 30 мг/л), $L_{NdLS} = (2,16 \pm 0,12)$ м [12].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 16-12-10322.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов И. П., Безруков Л. Б., Новикова Г. Я., Янович Е. А. // ПТЭ. 2017. №4. С. 82–86.
2. Goett J., Napolitano J., Yeh M., Hahn R., Cumming J. B., Hans S., Rosero R., Diwan M., Sexton K. // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 637. P. 47; doi: 10.1016/j.nima.2011.02.051.
3. Wurm M., von Feilitzsch F., Göger-Neff M., Hofmann M., Lachenmaier T., Lewke T., Marrodán Undagoitia T., Meindl Q., Möllenberg R., Oberauer L., Potzel W., Tippmann M., Todor S., Traunsteiner C., Winter J. // Rev. Sci. Instr. 2010. V. 81. P. 053301; doi: 10.1063/1.3397322.
4. Piepke A., Moser S., Novikov V. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 432. P. 392; doi: org/10.1016/S0168-9002(99)00530-6.
5. Hai-Bo Yang, De-Wen Cao, Chang-Wei Loh, Ai-Zhong Huang, Rui Zhang, Yu-Zhen Yang, Zhi-Qiang Qian, You-Hang Liu, Xue-Yuan Zhu, Bin Xu, Ming Qi. arXiv:1703.01867 [physics.ins-det].
6. Lightfoot P. K., Kudryavtsev V. A., Spooner N. J. C., Liubarsky I., Luscher R., Smith N. J. T. // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 522. P. 439; doi: 10.1016/j.nima.2003.11.390.
7. Yeh M., Garnov A., Hahn R. L. // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 578. P. 329; doi: 10.1016/j.nima.2007.03.029.
8. Ding Y., Zhang Z., Liu J., Wang Z., Zhou P., Zhao Y. // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 584. P. 238; doi: 10.1016/j.nima.2007.09.044.
9. Elisei F., Gatti F., Goretti A., Hagner T., Masetti F., Mazzucato U., Ranucci G., Schoenert S., Testera G., Ullucci P., Vitale S. // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 400. P. 53; doi: 10.1016/S0168-9002(97)00933-9.
10. Friesenhahn S. J. // Rev. Sci. Instr. 1971. V. 42, No. 7. P. 1016; doi: 10.1063/1.1685271.
11. Coleman W., Bernstein A., Dazeley S., Svoboda R. // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 595. P. 339; doi: 10.1016/j.nima.2008.06.049.
12. Барабанов И. П., Безруков Л. Б., Cattadori C., Данилов Н. А., Di Vacri A., Ianni A., Nisi S., Новикова Г. Я., Ortica F., Romani A., Salvo C., Смирнов О. Ю., Янович Е. А. // ПТЭ. 2012. №5. С. 37.

Получено 19 апреля 2018 г.