

Gd- И Nd-СОДЕРЖАЩИЕ ЖИДКИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ

© 2020 г. Г. Я. Новикова^{1)*}, М. В. Соловьева^{1),2)}, Е. А. Янович¹⁾

Поступила в редакцию 14.08.2019 г.; после доработки 14.08.2019 г.; принята к публикации 14.08.2019 г.

Рассмотрены факторы, влияющие на стабильность Gd- и Nd-содержащих жидких органических сцинтилляторов, предназначенных для крупномасштабных экспериментальных установок нейтринной физики и астрофизики. Сделан анализ влияния состава (тип и структурная формула Gd-, Nd-соединений) на оптические характеристики сцинтиллятора. Показано, что одной из причин деградации (уменьшение прозрачности) сцинтиллятора является окисление алкилбензолов. Соединения Gd и Nd могут являться катализаторами процессов окисления.

DOI: 10.31857/S0044002720010109

ВВЕДЕНИЕ

Gd-содержащие жидкие органические сцинтилляторы (Gd-LS) в настоящее время находят широкое применение при решении фундаментальных и прикладных задач в области нейтринной физики [1–11].

Введение гадолиния в состав сцинтиллятора обеспечивает более высокую эффективность регистрации антинейтрино по реакции обратного бета-распада, в которой мишенью служат ядра атома водорода, входящие в состав компонентов сцинтиллятора (главным образом, углеводородного растворителя):

$$\nu + p = e^+ + n. \quad (1)$$

Высокое сечение захвата нейтрона изотопами ^{157}Gd , ^{155}Gd и большая энергия (~ 8 МэВ) испускаемых гамма-квантов позволяют надежно дискриминировать нейтринные события от фоновых.

В отличие от гадолиния, который в сцинтилляционных детекторах для регистрации антинейтрино играет вспомогательную роль, неодим, а точнее изотоп неодима — ^{150}Nd — сам является предметом фундаментального исследования — двойного безнейтринного бета-распада [12]. Поиск такого вида распада крайне важен для установления природы нейтрино и определения его массы. Постановка такого типа экспериментов требует большой массы мишени и низкого фона, как внешнего от космических лучей, так и внутреннего радиоактивного фона самого детектора.

Гадолиний и неодим относятся к одному семейству f -элементов, что во многом определяет свойства и методы получения Gd/Nd-соединений, которые используются для создания жидких органических сцинтилляторов.

Настоящая работа посвящена анализу существующих и планируемых экспериментов с использованием жидких сцинтилляционных детекторов на основе Gd и Nd с точки зрения влияния состава сцинтиллятора на его стабильность.

Gd- И Nd-СОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ В LS

Большинство известных в настоящее время действующих и планируемых экспериментальных установок с применением Gd-содержащих жидких органических сцинтилляторов использует в качестве растворенного соединения гадолиния только два типа комплексов. Это 3,5,5-триметилгексаноат ($\text{Gd}(\text{TMHA})_3$) [1–3, 6, 9–11], который относится к классу карбоксилатов и 2,2,6,6-тетраметилгептандионат ($\text{Gd}(\text{TMHD})_3$) [4, 5, 7, 8] (класс бета-дикетонатов).

Выбору таких составов Gd-LS предшествовали многочисленные лабораторные исследования [13–19], а также накопленный опыт менее удачных экспериментов, в которых использовались другие композиции и, как следствие, Gd-LS быстро деградировал (Chooz [20] (нитрат гадолиния, дополнительный растворитель — гексанол), Palo Verde [21] (в качестве концентрата гадолиния использовался коммерческий Gd-LS — BC-21, который разбавлялся смесью PC и минерального масла)).

¹⁾Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

²⁾Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия.

*E-mail: g-novikova@mail.ru

Гадолиний и неодим как представители семейства f -элементов имеют высокое координационное число, т.е. способность образовывать дополнительные связи по донорно-акцепторному механизму. Для стабилизации и увеличения растворимости соединений Gd/Nd в органическом сцинтилляторе часто вводят в состав комплекса дополнительный лиганд. Так, в эксперименте Double Chooz [4] был использован дополнительный растворитель тетрагидрофуран, т.е. фактически был получен комплекс бета-дикетоната с тетрагидрофураном, который не только лучше растворяется в основном растворителе (PXE), но и, являясь координационно-насыщенным, оказывается более устойчивым по сравнению с чистым бета-дикетонатом.

В случае карбоксилатов металлов (Gd/Nd) для стабилизации характеристик сцинтиллятора можно использовать избыток карбоновой кислоты. В этом случае кислота (НТМНА) играет роль дополнительного лиганда [17], обеспечивая образование устойчивого комплекса $\text{Gd}(\text{ТМНА})_3 \cdot \text{НТМНА}$.

Таким образом, для создания стабильных металлосодержащих (Gd/Nd) сцинтилляторов важно, чтобы используемые карбоксилаты и бета-дикетонаты были координационно-насыщены.

Преимуществом бета-дикетонатов и их комплексов по сравнению с карбоксилатами является летучесть, т.е. способность при относительно невысокой температуре переходить из твердого в газообразное состояние без разложения. Это свойство используется для тонкой очистки металлов от примесей тяжелых элементов, в частности урана и тория, что является очень важным при создании низкофоновых сцинтилляционных детекторов Gd/Nd-LS.

Недостатком бета-дикетонатов и их комплексов является меньший световой выход по сравнению с карбоксилатами, что будет подробно изложено в следующей главе на примере создания Nd-LS.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ ФОРМУЛЫ КОМПЛЕКСА НЕОДИМА НА СВЕТОВОЙ ВЫХОД

Для создания Nd-LS первоначально использовались карбоксилаты неодима: 2-метилвалериат с растворителем РС [22] и триметилгексаноат с растворителем ЛАБ [23, 24]. Триметилгексаноат неодима получался по методике, разработанной для создания Gd-LS [17].

Поскольку в естественной смеси содержится всего 5.6% изотопа ^{150}Nd , желательно использовать обогащенный неодим. Для этого случая интерес представляют летучие комплексы бета-дикетонатов неодима, которые можно было бы использовать как для разделения изотопов методом

центрифугирования, так и для создания на их основе Nd-LS. Свойство летучести комплексов неодима делает возможным проведение глубокой очистки от радиоактивных примесей с использованием метода сублимации или молекулярной дистилляции непосредственно перед вводом в сцинтиллятор.

Для исследования световых выходов были выбраны комплексы неодима с фторированными бета-дикетонами, так как известно, что наличие в молекуле электроотрицательных атомов фтора увеличивает летучесть синтезируемых бета-дикетонатов металлов [25]. Введение в координационную сферу РЗЭ дополнительных лигандов, таких как 1,2-диметоксиэтан и диглим, увеличивает растворимость и стабильность комплексов, препятствуя их гидролизу с последующим образованием олигомеров.

Для оценки влияния электроотрицательных элементов на световой выход сцинтиллятора были отобраны комплексы с разным количеством фтора в бета-дикетонах и разным количеством кислорода в нейтральных добавках.

Используемые разнوليгандные комплексы синтезировались по методике, изложенной в работе [26].

Исследовались следующие комплексы:

1. $\text{Nd} \cdot (\text{hfa})_3 \cdot \text{glyme}$ (6 атомов фтора, 2 атома кислорода),
2. $\text{Nd} \cdot (\text{hfa})_3 \cdot \text{diglyme}$ (6 атомов фтора, 3 атома кислорода),
3. $\text{Nd} \cdot (\text{dfa})_3 \cdot \text{glyme}$ (10 атомов фтора, 2 атома кислорода),

где

hfa — анион гексафторацетилацетона,

dfa — анион 1,1,1,2,2,6,6,7,7,7-декафтор-3,5-гептандиона,

glyme — моноглим (1,2-диметоксиэтан $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_3$),

diglyme — 1-метокси-2-[2-(1-метоксиэтокси)]этан ($\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_2\text{CH}_3$).

На рис. 1 представлены зависимости световых выходов сцинтиллятора (ВРО — 2 г/л) от концентрации неодима для исследуемых комплексов, для сравнения приводится также подобная зависимость для триметилгексаноата неодима, полученная ранее [23]. Концентрации неодима измерялись методом комплексонометрического титрования с 0.005 М раствором трилона-Б (динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты) (ацетатный буфер, pH = 5.8; индикатор — ксиленоловый оранжевый).

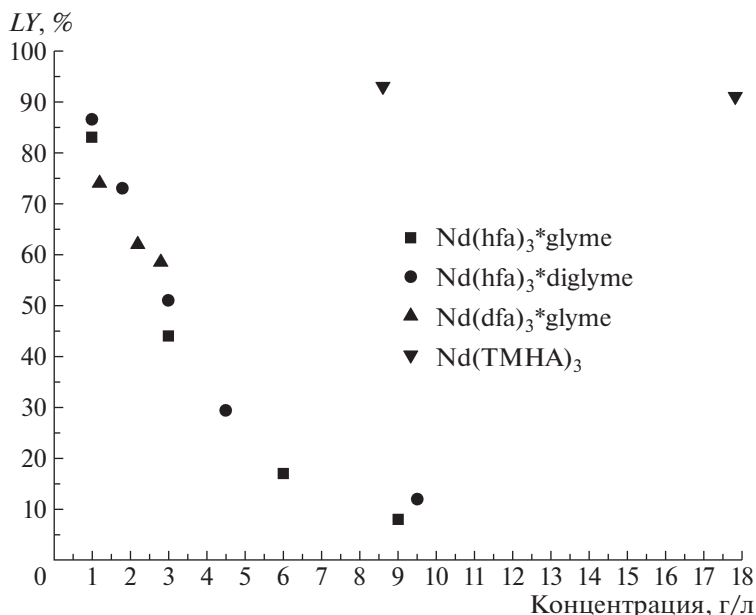


Рис. 1. Зависимость световыхода (LY , %) сцинтиллятора от концентрации неодима при использовании $Nd(TMHA)_3$ и фторированных бета-дикетонатных комплексов неодима.

Из рис. 1 видно, что кривые световыхода для всех трех исследуемых бета-дикетонатных комплексов в пределах 5% ошибки практически совпадают, т.е. световыход не зависит от количества атомов фтора или кислорода в исследуемом комплексе, а определяется только молекулярной структурой самого бета-дикетоната. При образовании координационных связей между атомами кислорода и ионом металла возникает устойчивый шестичленный цикл, в котором отрицательный электрический заряд полностью делокализован между углеродными и кислородными атомами.

По-видимому, комплекс с такой структурой, в отличие от карбоксилатного, значительно более сильно влияет на механизм передачи энергии возбуждения в сцинтилляторе, что приводит к уменьшению величины световыхода. Но при малых концентрациях металла (в случае использования крупномасштабных детекторов) бета-дикетонатные комплексы, как видно из рис. 1, могут быть конкурентоспособны с карбоксилатными.

СТАБИЛЬНОСТЬ Gd—LS

Успешная работа сцинтилляционных детекторов, предназначенных для проведения нейтринных экспериментов, во многом определяется стабильностью характеристик жидкого органического сцинтиллятора.

Последнее время появляется много работ, где исследуется стабильность Gd—LS [27–30]. Например, в работе [27] делается вывод о стабильности Gd—LS (объем 10 л, состав как в Daya Bay) только

на том основании, что концентрация гадолиния остается неизменной в течение исследуемого периода (602 сут). Концентрацию гадолиния измеряли двумя способами — химическим методом (титрование) и методом измерения времени задержки (захват нейтрона). При этом постоянство концентрации гадолиния только частично демонстрирует стабильность свойств органического сцинтиллятора.

Важной характеристикой сцинтилляционного детектора, определяющей его энергетическое разрешение, является число фотонов, достигших фотоприемника. Количество этих фотонов, образовавшихся в результате взаимодействия ионизирующего излучения с жидкой средой, зависит как от световыхода (LY), так и прозрачности сцинтиллятора.

В работе [28] в модуле объемом 30 л исследовалась стабильность Gd—LS в присутствии различных конструкционных материалов (сталь и акрил). Измерения показали, что за год светосбор сцинтиллятора уменьшился на 10%.

В эксперименте RENO для оценки стабильности свойств Gd—LS использовалась длина ослабления света (L). Было найдено, что за время работы ~ 4 г. (1351 сут) она уменьшилась на 50% [29]. Начальная длина ослабления была больше 10 м. В RENO измерения проводились *in situ* непосредственно в сцинтилляторе с использованием радиоактивных источников.

Длина ослабления света является очень чувствительной характеристикой к любой деградации

сцинтиллятора, которая может быть вызвана изменением структуры гадолиниевого комплекса, окислительными процессами как в самом органическом сцинтилляторе, так и при контакте с конструктивными материалами и т.д.

В отличие от RENO, в эксперименте Daya Bay, где также проводился мониторинг *in situ* длины ослабления света, деградация составила всего 1.3% в год [3].

В чем причина такого расхождения в величинах деградации Gd—LS в экспериментах, где использовался один и тот же состав сцинтиллятора?

Причина может заключаться в том, что в Daya Bay большее внимание было уделено очистке всех используемых реактивов.

Так, для очистки используемой для синтеза 3,5,5-триметилгексановой кислоты применялась тонкоплёночная вакуумная дистилляция, и было показано, что в результате очистки поглощение света самой кислотой становится в 2 раза меньше в области, чувствительной для ФЭУ [3]. Это очень важно, так как 3,5,5-триметилгексановая кислота не растворима в воде и, в случае применения экстракции (как это делается в RENO) или промывки после синтеза твердой соли водой с последующим растворением в ЛАБе (в Daya Bay), избыток кислоты переходит в органический сцинтиллятор.

Большое значение в Daya Bay придавалось очистке РРО, которая включала в себя фильтрацию после плавления, дистилляцию и рекристаллизацию. После всех этих процедур оптические свойства концентрированного раствора РРО в ЛАБе (10 г/л) значительно улучшились [3].

Также применялась очистка исходной соли $GdCl_3 \cdot H_2O$, особое внимание было уделено очистке от окрашенных примесей железа, что также улучшило оптические свойства растворов [3, 31].

С точки зрения очистки от примесей, которые могут усиливать деградацию сцинтиллятора, применение комплексов бета-дикетонатов имеет преимущество в том, что их можно очищать непосредственно перед растворением в органическом растворителе методом сублимации. Очистка бета-дикетонатов гадолиния (эксперимент Double Chooz) привела к уменьшению значения поглощения света растворами почти в 2 раза [5].

Кроме того, в эксперименте Double Chooz использовалась смесь растворителей, в которой 80% составлял насыщенный углеводород додекан. Додекан имеет высокую прозрачность и в меньшей степени подвержен окислению по сравнению с алкилбензолами.

На наш взгляд, проблеме окисления алкилбензолов, которые составляют основу всех жидких органических сцинтилляторов, следует уделить особое внимание.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ СЦИНТИЛЛЯТОРА

На наш взгляд, одним из основных факторов, влияющих на стабильность свойств органического сцинтиллятора, является образование продуктов окисления алкилбензолов. Алкилбензолы являются основными растворителями для приготовления жидкого органического сцинтиллятора. В ряде случаев алкилбензол используется как один из компонентов в смеси растворителей с предельными углеводородами (додекан и др.). Одними из самых распространенных алкилбензолов, входящих в состав сцинтиллятора, являются ЛАБ, фенилксилилэтан (РХЕ), псевдокумол (РС).

Первичным соединением, которое образуется при окислении любого алкилбензола, является его гидропероксид.

Как известно [32], ЛАБ российского производства (ООО Кинеф, г. Кириши) является смесью 20 алкилбензолов, которые имеют от 10 до 13 атомов углерода в алкильном радикале, все алкилы являются разветвленными. Простейшим гомологом ЛАБа является изопропилбензол (ИПБ), тривиальное его название кумол. Поэтому ИПБ был выбран в качестве модельного соединения для исследования процессов окисления ЛАБа и влияния соединений гадолиния на эти процессы.

На рис. 2 показаны спектры 0.001 М бензола, ЛАБа и гидропероксида кумола в гексане.

Из рис. 2 видно, что спектр ЛАБа сдвинут в длинноволновую область по сравнению с чистым бензолом за счет влияния алкильных радикалов на структуру бензола (батохромный сдвиг). Гидропероксид кумола имеет больший коэффициент экстинкции по сравнению с ЛАБом и сильнее сдвинут в длинноволновую область за счет влияния перекисной группировки на бензольное кольцо.

На прозрачность ЛАБа влияет как время, прошедшее с момента его получения и очистки, так и условия хранения. В качестве параметра прозрачности часто используется длина ослабления света (L), т.е. расстояние, на котором число фотонов уменьшается в e раз. Из измеренных спектров поглощения ЛАБа для длин волн 440, 430, 420 нм были рассчитаны их длины ослабления.

Влияние условий хранения на прозрачность демонстрирует тот факт, что свежеполученный ЛАБ, поставляемый заводом в таре большого объема, имеет очень хорошую прозрачность ($L_{440} = 24$ м, $L_{430} = 14$ м) [33], в то время как образец ЛАБа (объемом ~ 100 мл), хранящийся в лаборатории при комнатной температуре, быстро теряет свои оптические характеристики.

Методика очистки в сильной степени влияет на длину ослабления света в растворителе. Одним из

Таблица 1. Длина ослабления света (L) и концентрация гидропероксидов ($C_{гп}$) в ЛАБ и ИПБ

Образец ($V_{Al_2O_3} : V_{раств.}$)	Дата очистки	Дата измерения	L_{440}, M	L_{430}, M	L_{420}, M	$C_{гп}, ммол/л$
ЛАБ (1 : 1)	17.04.19	17.04.19	86.9	48.3	43.5	0.20
ЛАБ (1 : 1)	05.03.19	17.04.19	54.3	39.5	36.2	0.20
ЛАБ (1 : 1)	11.11.18	17.04.19	33.4	25.5	24.2	
ЛАБ (1 : 6)	15.04.18	17.04.19	22.8	14.5	5.23	0.49
ЛАБ неочищ.	хранился с 02.02.18	17.04.19	11.4	8.9	5.64	0.59
ИПБ (1 : 1.5)	27.02.19	27.02.19	13.1	10.4	9.9	0.20
ИПБ (1 : 2)	14.02.19	18.02.19	9.9	8.7	8.4	
ИПБ (1 : 2)	14.02.19	27.02.19	9.3	7.9	7.5	0.55
ИПБ неочищ.		18.02.19	6.6	5.9	5.5	
ИПБ неочищ.		27.02.19	6.0	5.3	5.2	0.61

самых распространенных способов очистки растворителей для сцинтилляторов является хроматографическая очистка на оксиде алюминия, которая впервые была применена в работе [34]. Соотношение объемов оксида алюминия и очищаемого растворителя является важным параметром. Наилучшие результаты для очистки ЛАБа получаются при соотношении $V_{Al_2O_3} : V_{раств.} = 1 : 1$.

В табл. 1 приведены длины ослабления света (L) для ЛАБа, изопробилбензола (ИПБ) в зависимости от условий очистки и времени хранения, а также в последнем столбце дана концентрация гидропероксидов в исследуемых образцах ($C_{гп}$).

Из результатов табл. 1 видно, что длина ослабления света как у ЛАБа, так и ИПБ падает со временем, прошедшим со дня очистки. Длина ослабления света у ЛАБа больше, чем у ИПБ, как у очищенного, так и неочищенного.

Можно предположить, что в процессе хранения на воздухе во всех исследуемых образцах углеводородов (ЛАБ, ИПБ) образуются продукты окисления, имеющие полосу поглощения в более длинноволновой области и обладающие большим коэффициентом экстинкции по сравнению с исследуемым растворителем.

Из данных, приведенных в табл. 1, можно заметить, что существует корреляция между длиной ослабления света и концентрацией гидропероксидов алкилбензолов, чем больше длина ослабления света, тем меньше концентрация гидропероксидов в исследуемом образце. (Гидропероксиды в образцах ЛАБа и ИПБ были проанализированы йодометрическим методом [35].)

Тот факт, что длина ослабления света у ЛАБа больше, чем у изопробилбензола, можно объяснить тем, что более длинные, чем у кумола, алкильные радикалы ЛАБа препятствуют реакциям окисления (стерический фактор).

ВЛИЯНИЕ ГАДОЛИНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ОКИСЛЕНИЯ АЛКИЛБЕНЗОЛА

Чтобы понять, как соединения гадолия будут влиять на процессы окисления, были исследованы процессы окисления изопробилбензола кислородом воздуха при температуре 120°C без катализатора и в присутствии триметилгексаноата гадолия, концентрация которого составляла 0.0064 моль/л (1 г/л).

На рис. 3 показаны зависимости поглощения света при 330 нм (A) от времени окисления для проб чистого ИПБ (треугольники) и растворов ИПБ с гадолинием.

Из рис. 3 видно, что с увеличением времени окисления значения поглощения при 330 нм для проб с гадолинием становятся существенно выше, чем без гадолия, хотя начальные значения поглощения очень близки.

Методом газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ) в реакционной массе также были найдены ацетофенон и диметилфенилкарбинол (2-фенил, 2-пропанол), концентрация которых увеличивается со временем окисления.

Концентрация гадолия после окисления в течение 2 ч при температуре 120°C не изменилась, никаких осадков замечено не было.

Поэтому, на наш взгляд, нельзя судить о стабильности Gd-содержащего сцинтиллятора только

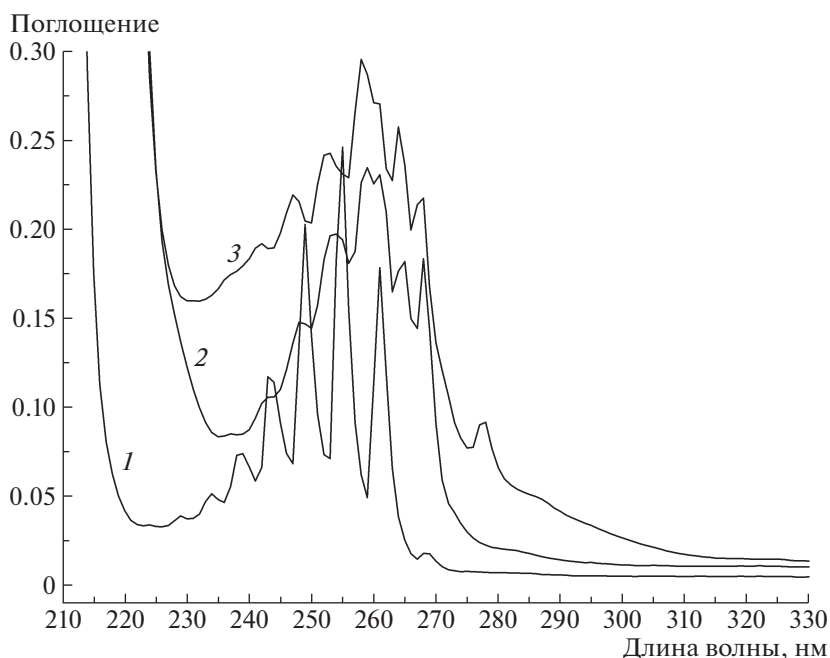


Рис. 2. Спектры поглощения 0.001 М растворов бензола, ЛАБа и гидропероксида кумола в гексане. 1 — бензол, 2 — ЛАБ, 3 — гидропероксид кумола. Измерены в 1 см кюветах по отношению к гексану.

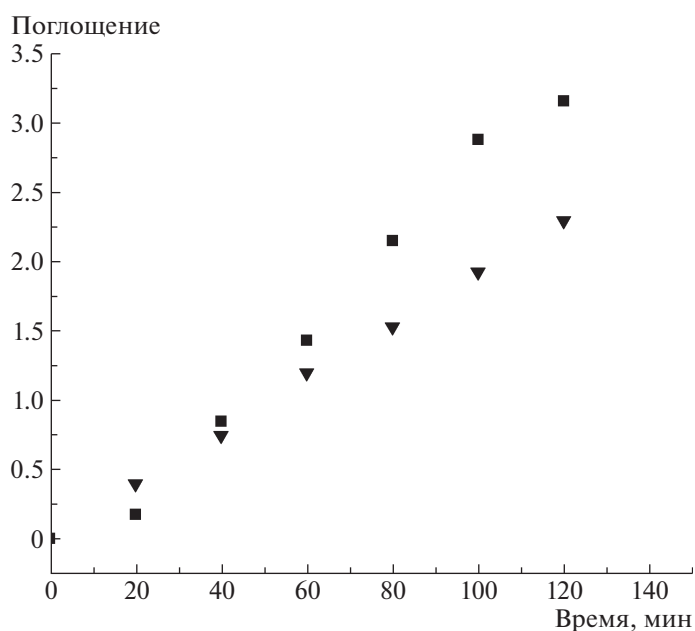


Рис. 3. Зависимость поглощения света (A) при 330 нм от времени окисления для ИПБ (▼) и растворов ИПБ с гадолинием ($C_{\text{Gd}} = 1 \text{ г/л}$) (■).

по неизменности концентрации гадолиния в нем, как это было сделано в работе [27].

Концентрация гадолиния может не изменяться, но его присутствие может влиять на увеличение концентрации продуктов окисления и, как следствие, уменьшение прозрачности сцинтиллятора. Для сцинтилляторов небольшого объема такое

уменьшение прозрачности может не сказываться на световых выходе сцинтиллятора, но при увеличении его объема будет играть существенную роль.

Также, на наш взгляд, даже при использовании довольно чистых промышленных растворителей, таких как ЛАБ, недостаточно просто продувать их инертным газом, чтобы удалить кислород, но необ-

ходимо еще дополнительно очищать их от гидроксидов, которые могут претерпевать дальнейшие превращения и ухудшать прозрачность сцинтиллятора.

Особенно это важно для Gd- и Nd-содержащих жидких органических сцинтилляторов, так как комплексы этих металлов могут служить катализаторами процессов окисления алкилбензолов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке жидких органических сцинтилляторов с Nd/Gd желательно учитывать следующее:

1. Для стабилизации характеристик сцинтилляторов важно, чтобы используемые карбоксилаты и бета-дикетонаты Nd/Gd были координационно-насыщены.

2. Световой выход карбоксилатов выше, чем у бета-дикетонатов, но сопоставим при малых концентрациях металлов.

3. Преимуществом бета-дикетонатов по сравнению с карбоксилатами является летучесть, что дает дополнительную возможность очистки соединений Nd/Gd.

4. Основной растворитель сцинтиллятора должен быть тщательно очищен от продуктов окисления и всегда должен храниться в инертной атмосфере, что особенно важно для создания Gd- и Nd-содержащих жидких органических сцинтилляторов, так как вводимые в сцинтиллятор соединения этих металлов могут оказывать каталитическое воздействие на процессы окисления алкилбензолов.

Исследовательская работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-12-01331.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.-B. Kim, Nucl. Part. Phys. Pros. **265–266**, 93 (2015); doi: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.06.024
2. F. P. An, J. Z. Bai, A. B. Balantekin, H. R. Band, D. Beavis, W. Beriguete, M. Bishai, S. Blyth, K. Boddy, R. L. Brown, B. Cai, G. F. Cao, J. Cao, R. Carr, W. T. Chan, J. F. Chang, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 171803 (2012); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.171803>
3. W. Beriguete, J. Cao, Y. Ding, S. Hans, K. M. Heeger, L. Hu, A. Huang, K. Luk, I. Nemchenok, M. Qi, R. Rosero, H. Sun, R. Wang, Y. Wang, L. Wen, Y. Yang, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **763**, 82 (2014).
4. The Double Chooz Collaboration (Y. Abe *et al.*), JHEP **1410**, 086 (2014); [https://doi.org/10.1007/JHEP10\(2014\)086](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2014)086)
5. C. Buck and M. Yeh, arXiv: 1608.04897v1 [physics.ins-det].
6. Y. J. Ko *et al.* (NEOS Collab.), Phys. Rev. Lett. **118**, 121802 (2017).
7. C. Buck, B. Gramlich, M. Linder, C. Roca, and S. Schoppmann, arXiv: 1812.02998v1 [physics.ins-det].
8. J. Zhu, H. Ren, Y. Bi, Y. Xu, and L. Zhang, J. Lumin. **194**, 494 (2018).
9. А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов, А. К. Фомин, В. Г. Зиновьев, П. В. Неустроев, В. Л. Головцов, А. В. Чёрный, О. М. Жеребцов, А. О. Полюшкин, В. П. Мартемьянов, В. Г. Тарасенков, В. И. Алёшин, А. Л. Петелин, А. Л. Ижутов, А. А. Тузов и др., ЖТФ **87**, 294 (2017).
10. М. Б. Громов, Г. А. Лукьянченко, Г. Я. Новикова, Б. А. Обиняков, А. Ю. Оралбаев, М. Д. Скорохватов, С. В. Сухотин, А. С. Чепурнов, А. В. Этенко, ЭЧАЯ **48**, 953 (2017) [Phys. Part. Nucl. **48**, 981 (2017)].
11. M. Gromov, D. Kuznetsov, A. Murchenko, G. Novikova, B. Obinyakov, A. Oralbaev, K. Plakitina, M. Skorokhvatov, S. Sukhotin, A. Chepurnov, and A. Etenko, J. Phys.: Conf. Ser. **934**, 012005 (2017).
12. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А. В. Вересникова, Ю. М. Гаврилюк, В. И. Гуренцов, В. В. Казалов, В. В. Кузьминов, Г. Я. Новикова, С. В. Семенов, В. В. Синев, Г. О. Цветков, Е. А. Янович, ЯФ **82**, 100 (2019) [Phys. At. Nucl. **82**, 89 (2019)].
13. Ya. Ding, Z. Zhang, J. Liu, Z. Wang, P. Zhou, and Yu. Zhao, Nucl. Instrum. Methods A **584**, 238 (2008).
14. F. Ardellier *et al.* (Double Chooz Collab.), hep-ex/0606025v4.
15. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, C. M. Cattadori, N. A. Danilov, A. di Vacri, Yu. S. Krilov, L. Ioannucci, E. A. Yanovich, M. Aglietta, A. Bonardi, G. Bruno, W. Fulgione, E. Kemp, A. S. Malguin, A. Porta, and M. Selvi, J. Instrum. **5**, P04001 (2010).
16. Г. Я. Новикова, Н. И. Бакулина, А. В. Вологжанина, Б. В. Локшин, В. П. Моргалюк, ЖНХ **61**, 270 (2016) [Russ. J. Inorg. Chem. **61**, 257 (2016)].
17. Г. Я. Новикова, Н. И. Бакулина, В. П. Моргалюк, ЖНХ **59**, 389 (2014) [Russ. J. Inorg. Chem. **59**, 244 (2014)].
18. Г. Я. Новикова, И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Л. И. Белоус, Н. А. Данилов, А. А. Иванов, Р. Х. Зиганшин, Е. А. Янович, ЖНХ **54**, 1143 (2009) [Russ. J. Inorg. Chem. **54**, 1082 (2009)].
19. H. Furuta, Y. Fukuda, T. Hara, T. Haruna, N. Ishihara, M. Ishitsuka, C. Ito, M. Katsumata, T. Kawasaki, T. Konno, M. Kuze, J. Maeda, T. Matsubara, H. Miyata, Y. Nagasaka, K. Nitta, *et al.*, arXiv: 1108.2910v1 [hep-ex].
20. M. Apollonio *et al.* (Chooz Collab.), Phys. Lett. B **466**, 415 (1999).
21. A. G. Piepke, S. W. Mozer, and V. M. Novikov, Nucl. Instrum. Methods A **432**, 392 (1999).
22. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, С. Cattadori, Н. А. Данилов, А. Di Vacri, A. Ianni, S. Nisi, Г. Я. Новикова, F. Ortica, A. Romani, C. Salvo, О. Ю. Смирнов, Е. А. Янович, ПТЭ, № 5, 37 (2012) [Instrum. Exp. Techn. **55**, 545 (2012)].

23. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, ПТЭ, № 4, 82 (2017) [Instrum. Exp. Techn. **60**, 533 (2017)].
24. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, Письма в ЭЧАЯ **15**, 502 (2018) [Phys. Part. Nucl. Lett. **15**, 630 (2018)].
25. Д. Н. Суглобов, Г. В. Сидоренко, Е. К. Легин, *Летучие органические и комплексные соединения f-элементов* (Энергоатомиздат, Москва, 1987).
26. Л. Б. Безруков, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, А. И. Костылев, Н. А. Корсакова, Е. К. Легин, А. Е. Мирославов, М. Д. Караван, Б. В. Локшин, В. П. Моргалюк, ЖНХ **63**, 1555 (2018) [Russ. J. Inorg. Chem. **63**, 1564 (2018)].
27. Y. Hino, H. Furuta, and F. Suekane, arXiv: 1904.10243v1 [physics. ins. det].
28. М. Б. Громов, Д. С. Кузнецов, А. Е. Мурченко, Г. Я. Новикова, Б. А. Обиняков, А. Ю. Оралбаев, К. В. Плакитина, М. Д. Скорохватов, С. В. Сухотин, А. С. Чепурнов, А. В. Этенко, Письма в ЖТФ, № 6, 59 (2018) [Techn. Phys. Lett. **44**, 251 (2018)].
29. H. S. Kim *et al.* (RENO Collab.), arXiv: 1609.09483v1 [physics.ins-det].
30. M. Katsumata, H. Miya, N. Tamura, and T. Kawasaki, Nucl. Instrum. Methods A **629**, 50 (2011).
31. M. Yeh, J. B. Cumming, S. Hans, and R. L. Hahn, Nucl. Instrum. Methods A **618**, 124 (2010).
32. Н. И. Бакулина, Г. Я. Новикова, А. С. Редчин, Т. В. Бухаркина, С. В. Вержичинская, М. Г. Макаров, В. В. Зинченко, И. Ю. Кузнецов, Химическая промышленность сегодня, № 3, 38 (2018).
33. Л. Б. Безруков, Н. И. Бакулина, Н. С. Иконников, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, А. С. Чепурнов, Препринт ИЯИ РАН № 1382/2014 (Москва, 2014).
34. А. В. Воеводский, В. Л. Дадыкин, О. Г. Рязская, ПТЭ, № 1, 85 (1970).
35. И. С. Вашенков, С. В. Вержичинская, О. С. Гречишкина, М. А. Караджев, Е. С. Петина, Успехи в химии и химической технологии **28**(10), 10 (2014).

Gd- AND Nd-LOADING LIQUID ORGANIC SCINTILLATORS

G. Y. Novikova¹⁾, M. V. Solovyova^{1),2)}, E. A. Yanovich¹⁾

¹⁾ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²⁾ Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

The factors affecting the stability of Gd-, Nd-loading liquid organic scintillators designed for large-scale experimental installations of neutrino physics and astrophysics are considered. The analysis of the effect of the composition (type and structural formula of Gd, Nd compounds) on the optical characteristics of the scintillator was made. It was shown that one of the causes of degradation (decrease in transparency) of the scintillator is the oxidation of alkyl benzenes, the compounds Gd and Nd can be catalysts of the oxidation processes.