

И. И. Камнев, И. Б. Немченко, В. В. Тимкин

Литийсодержащий жидкий сцинтиллятор на основе микроэмульсии 1-метилнафталин-вода

Рассматриваются получение и исследование свойств нового устойчивого во времени жидкого литийсодержащего сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов и обеспечение экспериментов области нейтронной и нейтринной физики.

Известные в настоящее время литийсодержащие жидкие сцинтилляторы обладают значительными недостатками: низким световыходом, высокими пожароопасностью и токсичностью, низкой временной стабильностью.

В настоящем исследовании описано получение сцинтиллятора на основе микроэмульсий состава органический растворитель — вода с добавками соединений лития. Оригинальность и новизна нашего подхода состоят в совмещении в одном соединении свойств поверхностно-активного вещества и литийсодержащей добавки. Это позволило, с одной стороны, упростить состав, а с другой — увеличить устойчивость сцинтиллятора к агрегационным и седиментационным процессам.

Ключевые слова: жидкие сцинтилляторы, эффективность регистрации, тепловые нейтроны, литий, микроэмульсии, световыход.

Об авторах

Камнев Илья Ильич — инженер научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, аспирант государственного университета «Дубна».

Немченко Игорь Борисович — доцент, кандидат химических наук, ученый секретарь, заведующий кафедрой нанотехнологий и новых материалов государственного университета «Дубна», начальник группы научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Тимкин Виктор Владимирович — научный сотрудник научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Одним из способов регистрации нейтрино является использование реакции обратного β -распада на протонах, которыми богаты жидкие сцинтилляторы (ЖС)



Впервые этот метод был предложен Кованом и Рейнесом с соавторами [11]. Каждый образовавшийся позитрон практически мгновенно реагирует с электроном с выделением двух аннигиляционных гамма-

квантов ($E_\gamma = 0,511$ МэВ), а нейтрон замедляется в сцинтилляторе до тепловых энергий и захватывается протоном с выделением гамма-кванта с энергией 2,2 МэВ. Для увеличения эффективности регистрации тепловых нейтронов удобно использовать изотопы элементов, имеющие высокие сечения взаимодействия с тепловыми нейтронами (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики захвата тепловых нейтронов ядрами некоторых изотопов [8]

Изотоп	Содержание в естественной смеси, %	Реакция	Сечение захвата, барн	Регистрируемые частицы
^1H	99,985	(n, γ)	0,334	γ : 2,224 МэВ
^6Li	7,5	(n, α)	$9,4 \cdot 10^2$	α : 2,05 МэВ; ^3H : 2,73 МэВ
^{10}B	19,6	(n, α)	$3,8 \cdot 10^3$	α : 1,47 МэВ; ^7Li : 0,84 МэВ; γ : 0,48 МэВ
^{113}Cd	12	(n, γ)	$2,0 \cdot 10^4$	γ -каскад: до 8 МэВ
^{155}Gd	15	(n, γ)	$6,1 \cdot 10^4$	γ -каскад: до 8 МэВ
^{157}Gd	16	(n, γ)	$2,6 \cdot 10^5$	γ -каскад: до 8 МэВ

Состав, свойства и способы получения бор-, гадолиний- и кадмийсодержащих жидких и пластмассовых сцинтилляторов подробно описаны в нашей обзорной статье [4].

Целью настоящей работы является получение и исследование свойств нового устойчивого во времени жидкого литийсодержащего сцинтиллятора на основе микроэмульсий для регистрации тепловых нейтронов.

Почему именно литийсодержащего? Привлекательность Li-содержащих органических сцинтилляторов состоит в следующем:

1. Литий имеет изотоп с высоким сечением захвата тепловых нейтронов — ^6Li , содержание которого в естественной смеси достигает 7,5 %. И хотя это не очень много, обогащение естественной смеси изотопов лития не является существенной проблемой.

2. При захвате ядром ^6Li теплового нейтрона образуются ядра ^3H и ^4He , с энергией 2,73 МэВ и 2,05 МэВ, соответственно:



Образовавшиеся вторичные частицы уверенно регистрируются материалом сцинтиллятора.

3. Ядра изотопов лития примерно в 20 раз легче ядер изотопов кадмия и гадолиния, что при одинаковых массовых долях позволяет вводить в состав сцинтиллятора больше лития.

4. Соединения лития недороги. Их стоимость, как правило, в несколько раз ниже стоимости соединений кадмия и гадолиния.

Всё это вызывает повышенный интерес к литийсодержащим органическим сцинтилляторам и делает цель настоящего исследования интересной, актуальной и перспективной.

Первые публикации о Li-содержащих ЖС появились более пятидесяти лет назад,

однако, заметных успехов в данной области до сих пор не удалось достичь.

Проблема состоит в химии лития, которая, в некотором смысле, достаточно «бедна»: этот элемент практически не образует соединений, растворимых в органических веществах, применяемых для изготовления органических сцинтилляторов. Поэтому в качестве литийсодержащих добавок использовались его хлорид [16], салицилат [14; 17], пропионат [15], метилат [10]. Это вещества, имеющие ионные связи и, естественно, для их растворения нужны полярные вещества. В традиционных для сцинтилляционного материаловедения растворителях, таких как ароматические углеводороды (одно- и двухъядерные), добиться этого невозможно. Из-за этого в качестве основ для литийсодержащих ЖС использовались диоксан [17], его смеси с водой [14; 16; 17], толуольно-метанольные смеси [14; 15]. Результаты оказались легко предсказуемым, — очень низкий световыход и очень низкая температура вспышки сцинтилляторов.

Для получения сцинтиллятора на основе метилата лития использована нефтяная фракция с температурой кипения 250—320 °С и температурой вспышки 120 °С [3]. Ее применение позволило получать более безопасные в работе материалы. Однако метилат лития недостаточно устойчив и гидролизуется даже в присутствии следов влаги.

Коммерческое применение нашёл сцинтиллятор на основе псевдокумола — NE-320 [10]. Он имел неплохую прозрачность, но, вместе с тем, и очень низкий световыход при достаточно небольшом содержании металла: при введении всего 0,15 % лития световыход снижался более, чем в 2,5 раза.

В последние годы внимание к себе привлекает возможность получения литий-

содержащих ЖС на основе коллоидных и микрогетерогенных систем. В работе [12] описано получение скнтилляторов на основе псевдокумола и смеси ксилолов, содержащих наночастицы твердого ${}^6\text{Li}_3\text{PO}_4$ размером до 10 нм. Поверхность наночастиц покрывали гидрофобными группами для предотвращения их агрегации. Полученные скнтилляторы содержат от 0,8 % масс. до 1,1 % масс. Li, что примерно в 4–5 раз больше, чем при получении Li-содержащих ЖС стандартными способами.

Другим методом получения литийсодержащих ЖС на основе микрогетерогенных систем является эмульгирование водных растворов органических или неорганических соединений лития в скнтилляционных основах — получение микроэмульсий. В работе [13] описано использование в качестве основного вещества скнтиллятора 2,6-диизопропилнафталина, а в качестве литийсодержащей добавки — хлорида лития, обогащенного ${}^6\text{Li}$. В составе скнтиллятора также присутствуют и поверхностно-активные вещества.

Последняя публикация является первой и единственной самым непосредственным образом связанной с темой настоящего проекта. Представляется, что авторы прекратили свои исследования в этом направлении.

Обсуждение результатов

Микроэмульсии — многокомпонентные жидкие коллоидные (наноразмерные) системы, самопроизвольно образующиеся при смешивании двух жидкостей с ограниченной взаимной растворимостью в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). В отсутствие ПАВ компоненты разделяются сразу после эмульгирования. Микроэмульсии, в отличие от эмульсий, термодинамически устойчивы. Небольшой размер микрокапель (десятки нанометров) является причиной их прозрачности в оптическом диапазоне [1; 2; 5; 7; 9].

При выборе компонентов жидкого скнтиллятора особое внимание уделяется природе его основного вещества. Для органического компонента микроэмульсионной системы мы сформулировали следующие требования:

- быть доступным;
 - быть безопасным в работе (высокая температура кипения, высокая температура вспышки, низкая токсичность);
 - иметь хорошую конверсионную эффективность;
 - иметь плотность, близкую к единице. Это необходимо для достижения седиментационной устойчивости микроэмульсии.
- Одновременное сочетание этих условий реализуется у 1-метилнафталина (табл. 2). 1-метилнафталин (1-МН) — бесцветная, не смешивающаяся с водой жидкость. Применяется для изготовления жидких скнтилляторов, в производстве ПАВ, моющих средств, печатных красок и синтезе агрохимикатов.

Таблица 2. Физико-химические свойства 1-метилнафталина

Плотность, г/см ³	1,001
Температура кипения, °С	240—243
Температура вспышки, °С	82
Молекулярная масса, г/моль	142
Показатель преломления	1,615

Подобные требования (доступность, безопасность) применимы и к поверхностно-активному веществу. На наш взгляд, им полностью соответствует ди-(2-этилгексил)-фосфорная кислота (табл. 3). Ди-(2-этилгексил)-фосфорная кислота (D2ЕНРА) — бесцветная, частично смешивающаяся с водой жидкость. Используется в экстракционном извлечении цветных и редкоземельных металлов.

Таблица 3. Физико-химические характеристики ди-(2-этилгексил)-фосфорной кислоты

Плотность, г/см ³	0,974
Температура кипения, °С	399
Температура вспышки, °С	200
Молекулярная масса, г/моль	322
Показатель преломления	1,4420

В качестве скнтилляционных добавок мы выбрали хорошо известные и хорошо зарекомендовавшие себя 2,5 дифениллоксазол (РРО) и 1,4-ди-(5-фенил-2-оксазолил)-бензол (РОРОР) (рис. 1).

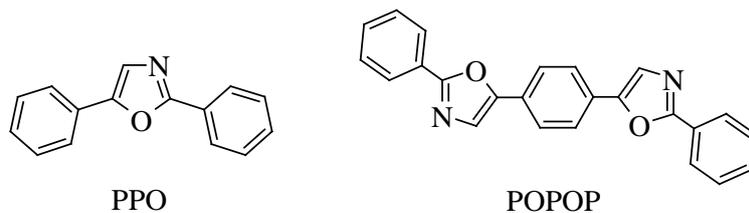


Рис. 1. 2,5-дифенилоксазол (PPO) и 1,4-ди-(5-фенил-2-оксазолил)-бензол (POPOP)

На основе этих компонентов была получена серия микроэмульсионных сцинтилляторов. Концентрация сцинтилляционных добавок во всех жидких сцинтилляторах со-

ставляла 0,5 %масс. для PPO и 0,002 5%масс. для POPOP относительно массы 1-метилнафталина. В табл. 4 приведён состав приготовленных смесей.

Таблица 4. Состав жидких микроэмульсионных сцинтилляторов на основе 1-метилнафталина

Объемная доля 1-метилнафталина, %	Объемная доля ди-(2-этилгексил)-фосфорной кислоты, %	Объемная доля воды, %
100	0	0
86	11	3
75	19	6
65	26	9
58	30	12

Наиболее важной характеристикой любого сцинтиллятора является световыход. При решении научных задач чаще всего используют его относительное значение, определяемое как отношение амплитуды импульсов от сцинтилляционного детектора излучения к аналогичному параметру друго-

го сцинтилляционного детектора в идентичных условиях измерения. В качестве такого стандартного образца нами выбран жидкий сцинтиллятор на основе 1-метилнафталина, не содержащий воды. В табл. 5 и на рис. 2 приведены результаты измерения световыхода и других свойств, полученных ЖС.

Таблица 5. Свойства жидких микроэмульсионных сцинтилляторов на основе 1-метилнафталина

Объемная доля воды, %	Световыход, отн. ед.	Плотность, г/см ³	Показатель преломления
0	1	1,009	1,615
3	0,79	0,987	1,589
6	0,59	0,962	1,565
9	0,40	0,927	1,546
12	0,37	0,908	1,530

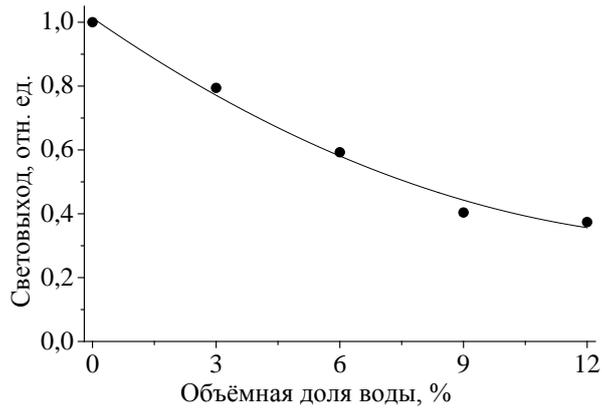


Рис. 2. Зависимость световыхода микроэмульсионных сцинтилляторов на основе 1-метилнафталина от объёмной доли воды

Увеличение концентрации воды приводит к закономерному снижению световыхода. На наш взгляд, причиной этого может быть одновременное действие двух факторов:

- разбавление активного в сцинтилляционном отношении компонента водой и

ди-(2-этилгексил)-фосфорной кислотой, приводящее к ухудшению переноса энергии;

- снижение прозрачности (рис. 3) за счет увеличения рассеяния на «микрокаплях воды» при увеличении ее концентрации.

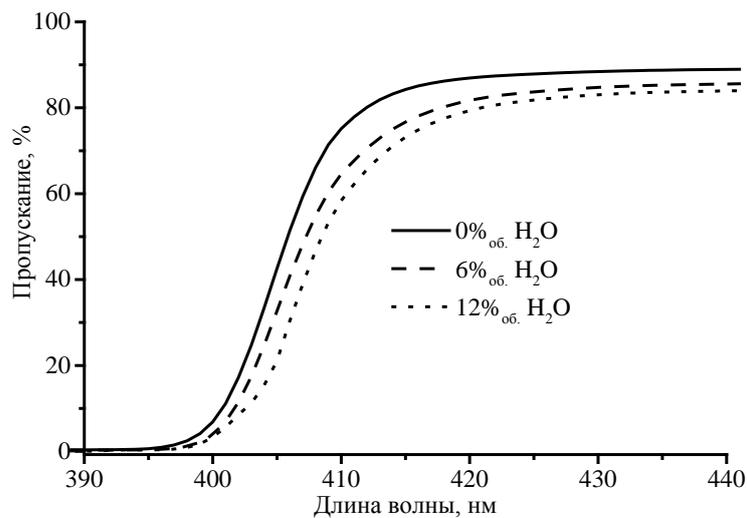


Рис. 3. Спектры пропускания ЖС на основе чистого 1-метилнафталина и некоторых сцинтилляторов на основе микроэмульсий, измеренные в кварцевых кюветах с толщиной поглощающего слоя 1 см относительно воздуха

Нами измерены спектры люминесценции полученных ЖС (рис. 4). Ее интенсивность, так же как и световыход, закономерно

снижается с увеличением объёмной доли воды в микроэмульсии.

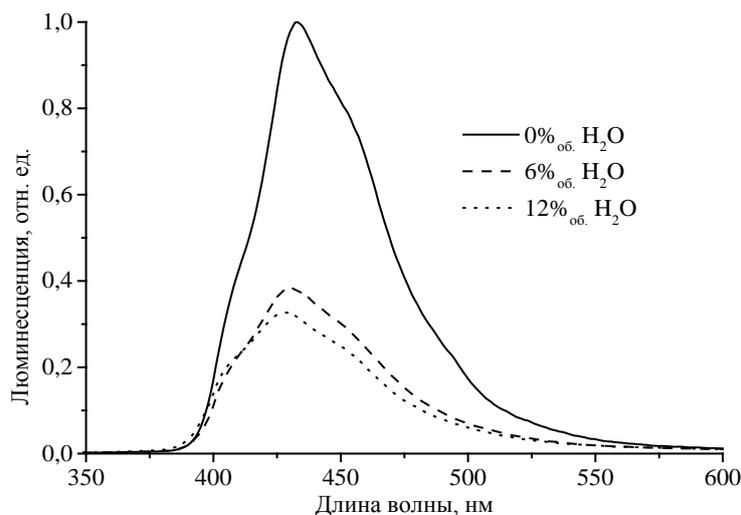


Рис. 4. Спектры люминесценции ЖС на основе чистого 1-метилнафталина и некоторых сцинтилляторов на основе микроэмульсий

Второй этап исследования состоял в использовании накопленного опыта для получения литийсодержащего микроэмульсионного сцинтиллятора. Принципиальным вопросом оказался выбор литийсодержащей добавки. В этой роли были испытаны несколько соединений лития: хлорид, нитрат, салицилат и бутират. Однако ни одно из них не позволило получить устойчивые микроэмульсии. Естественно, возникла необходимость использования дополнительного растворителя, который увеличил бы растворимость литийсодержащих соединений и одновременно выполнял роль со-ПАВ. Эти функции могут выполнять спирты. В качестве модельного соединения был выбран изопропиловый спирт (ИПС).

Включение в состав сцинтиллятора изопропилового спирта позволило ввести в сцинтиллятор большое количество воды, а затем и литийсодержащую добавку — пентаноат лития. Максимальное содержание Li в полученном сцинтилляторе составило 0,23 % масс. Объемное содержание всех компонентов в составе сцинтиллятора описывается соотношением: 1-МН : D2ЕНРА : ИПС : H₂O = 1 : 1 : 1 : 1. В качестве сцинтилляци-

онных добавок использовались те же 2,5-дифенилоксазол (РРО) и 1,4-бис(5-фенилоксазолил-2)бензол (РОРОР). Концентрация их по-прежнему была выбрана 0,5 % масс. для РРО и 0,0025 % масс. для РОРОР относительно 1-метилнафталина.

Были измерены спектры пропускания (рис. 5) и световыход полученного Li-содержащего сцинтиллятора. Он составил 17 % относительно световыхода сцинтиллятора на основе чистого 1-метилнафталина.

Полученный сцинтиллятор можно рассматривать лишь как модельную систему на пути к основному результату. Дело в том, что изопропиловый спирт имеет низкую температуру кипения и слишком летуч. Поэтому его использование в дальнейшем может приводить к нестабильности состава ЖС. С другой стороны, использование изопропилового спирта ограничивается его повышенной пожарной опасностью.

Альтернативой этому соединению стал октиловый спирт. Это соединение намного менее летуче и намного безопаснее в пожарном отношении, по сравнению с изопропиловым спиртом.

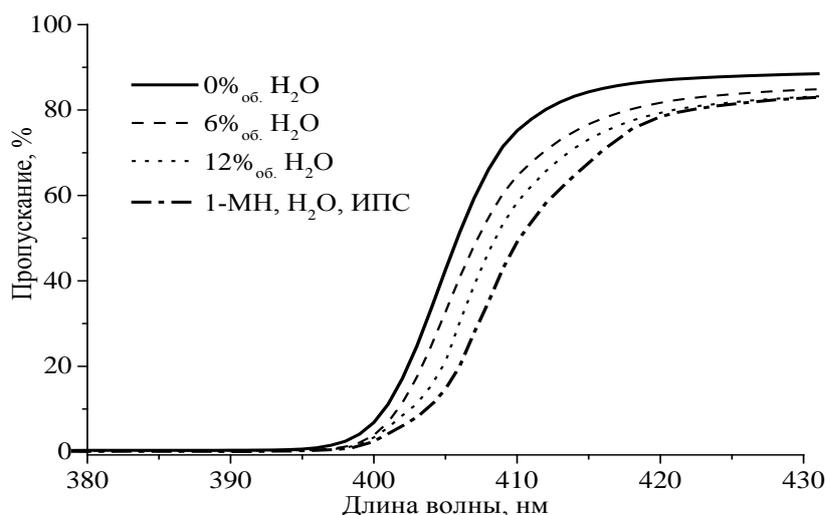


Рис. 5. Спектры пропускания сцинтиллятора на основе 1-метилнафталина и сцинтилляторов на основе смеси α -метилнафталина и изопропилового спирта, измеренные в кварцевых кюветах с толщиной поглощающего слоя 1 см относительно воздуха

Таблица 5. Некоторые физико-химические свойства октилового спирта

Плотность, г/см ³	0,827
Температура кипения, °С	196
Температура вспышки, °С	80
Молекулярная масса, г/моль	130
Показатель преломления	1,429

Таким образом, был сформулирован состав основного вещества нового жидкого микроэмульсионного сцинтиллятора:

- 1-метилнафталин;
- вода;
- октиловый спирт.

Принципиальным вопросом для решения поставленной задачи, естественно, оказался выбор литийсодержащей добавки. Это вещество, наряду с совместимостью с остальными компонентами системы, не должно ухудшать стабильности сцинтиллятора в целом. Наилучшим, в этом смысле, выбором, на наш взгляд, является сочетание свойств как литийсодержащей добавки, так и поверхностно-активного вещества в одном соединении. Для этого нам удалось получить литиевую соль ди-(2-этилгексил)-фосфорной кислоты.

На основе этих соединений была получена серия литийсодержащих жидких микроэмульсионных сцинтилляторов. Их состав представлен в табл. 6. Наибольшая концентрация лития, которой удалось достичь, — 0,47 % масс. Концентрация сцинтилляционных добавок — 0,5 % масс. для РРО и 0,0025 % масс. для РОРОР относительно 1-метилнафталина.

Благодаря такому выбору литийсодержащей добавки удалось преодолеть самое серьезное затруднение при получении литийсодержащих ЖС — их малую устойчивость во времени. Первые из полученных нами образцов устойчивы уже в течение более 1 года.

Таблица 6. Состав литийсодержащих жидких микроэмульсионных сцинтилляторов

Компонент	Содержание компонента			
	0,18	0,31	0,4	0,47
Li, масс. %	0,18	0,31	0,4	0,47
1-МН, об. %	33	29	25	22
Октанол, об. %	8	7	6,25	5,5
H ₂ O, об. %	17	28	37,5	44,5

На рис. 6 и 7 приведены спектры пропускания и люминесценции новых материалов.

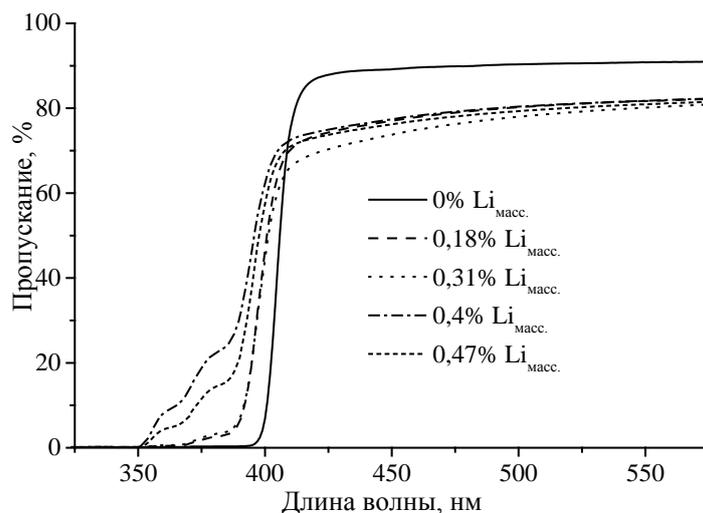


Рис. 6. Спектры пропускания не содержащего литий ЖС и литийсодержащих ЖС на основе системы 1-метилнафталин-октанол-вода, измеренные в кварцевых кюветках с толщиной поглощающего слоя 1 см относительно воздуха

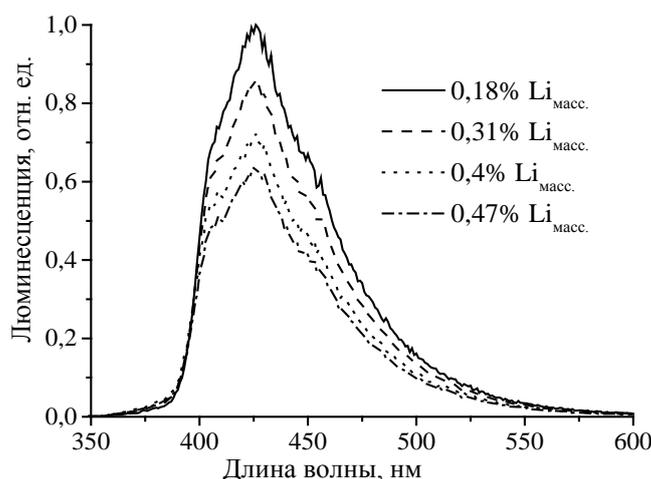


Рис. 7. Спектры излучения жидких литийсодержащих микроэмульсионных сцинтилляторов на основе 1-метилнафталин-октанол-вода

Следует отметить, что увеличение содержания воды и вместе с этим увеличение концентрации лития значительно снижают прозрачность образцов и интенсивность их люминесценции.

В табл. 7 приведены некоторые свойства полученных нами сцинтилляторов. Световыход измерен относительно образца на основе чистого 1-метилнафталина с концентрацией люминесцентных добавок: 0,5 % масс. РРО и 0,0025 % масс. РОРОР.

Интересно, что снижение прозрачности в видимой области и интенсивности люминесценции не коррелируют со значениями световыхода, который практически не зависит от концентрации лития. Полученные нами значения световыхода новых сцинтилляторов достаточно низки и находятся в пределах 5—6 % относительно световыхода ЖС на основе чистого α -метилнафталина. Однако амплитудные спектры, полученные от образцов, говорят о надежности измерений (рис. 8).

Таблица 7. Основные характеристики литийсодержащих жидких сцинтилляторов

Характеристика	Массовая доля лития, %			
	0,18	0,31	0,4	0,47
Плотность, г/см ³	0,926	0,937	0,950	0,9589
Световыход, отн. ед.	0,054	0,058	0,054	0,058
Показатель преломления	1,480	1,465	1,449	1,430
Количество атомов лития в 1 см ³ , ×10 ²²	0,014	0,025	0,033	0,039
Количество атомов углерода в 1 см ³ , ×10 ²²	2,87	2,48	2,19	1,96
Количество атомов водорода в 1 см ³ , ×10 ²²	5,45	5,62	5,77	5,89

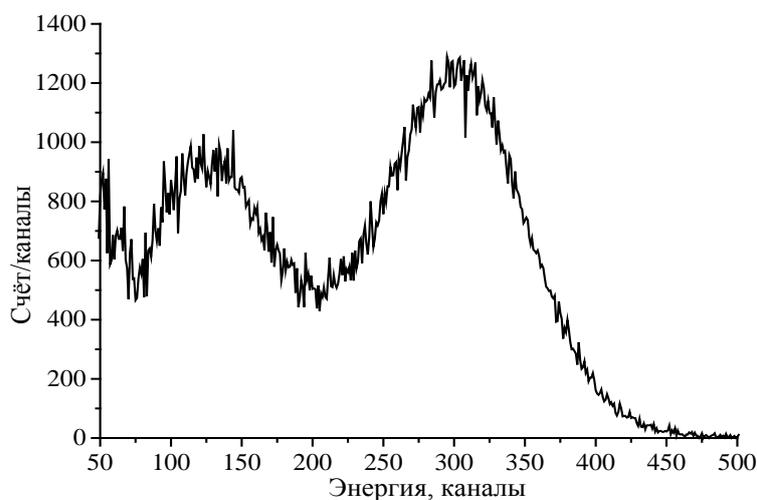


Рис. 8. Амплитудный спектр (источник излучения — ²⁰⁷Bi), полученный при измерении световыхода жидкого литийсодержащего сцинтиллятора с массовой долей лития 0,47 %

Экспериментальная часть

Ниже приведены некоторые экспериментальные методики и условия измерений.

1. Очистка α-метилнафталина.

1-Метилнафталин перемешивали с серной кислотой (квалификации «ОСЧ») в соотношении 100 мл кислоты на 1 л 1-метилнафталина при постоянном охлаждении и затем удаляли слой кислоты; операцию повторяли до прекращения окрашивания слоя кислоты. Затем 1-метилнафталин перемешивали с раствором соды для нейтрализации оставшейся кислоты и промывали дистиллированной водой. После осушки хлористым кальцием 1-метилнафталин перегоняли под вакуумом.

2. Приготовление обратных микроэмульсий.

Приготовление обратных микроэмульсий проходило в несколько этапов. На первом этапе готовили смесь органических рас-

творителей и ПАВ. На втором этапе растворяли гидроксид лития (LiOH·H₂O) в бидистиллированной воде при умеренном нагревании. Полученные растворы сливали вместе и перемешивали на магнитной мешалке при температуре 30 °С до полного просветления смеси. При этом смесь слегка разогревалась из-за образования литиевой соли ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты.

3. Приготовление литийсодержащих сцинтилляторов на основе обратных микроэмульсий.

В полученных микроэмульсиях растворяли люминесцентные добавки РРО и РОРОР. Концентрация сцинтилляционных добавок в полученных сцинтилляторах составила 0,5 %масс. для РРО и 0,0025 %масс. для РОРОР относительно α-метилнафталина.

4. Измерение световыхода.

Световойход измеряли на сцинтилляционном спектрометре в научно-экспериментальном отделе ядерной спектроскопии и радиохимии лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Условия измерений:

- источник излучения — ^{207}Bi ;
- материал кюветы — тефлон;
- материал выходного окна кюветы — фиолетовое стекло;
- отражатель — алюминизированный майлар.

Более подробно методика измерений описана в [6].

5. Спектры пропускания измерены при помощи спектрофотометра *UNICO UV 2804*, спектры люминесценции — при помощи спектрофлуориметра *СМ 2203*.

Заключение

1. Разработан не содержащий литий устойчивый во времени жидкий сцинтиллятор на основе микроэмульсии 1-метилнафталин — вода. Для этого:

- определен состав сцинтилляционной основы (1-метилнафталин, вода, ПАВ);
- проведен выбор ПАВ;
- подобраны сцинтилляционные добавки.

2. Изучены свойства сцинтиллятора для различных соотношений дисперсионная среда (1-метилнафталин) : дисперсная фаза (вода):

- измерены спектры пропускания и люминесценции;
- измерены показатель преломления и плотность;
- исследован световойход.

3. Разработан устойчивый во времени литийсодержащий жидкий сцинтиллятор на основе микроэмульсии 1-метилнафталин — вода. Для этого:

- в качестве литийсодержащей добавки выбрана литиевая соль ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты, одновременно выполняющая роль ПАВ;
- подобран вторичный растворитель, способствующий повышению растворимости литийсодержащей добавки.

4. Изучены свойства нового сцинтиллятора в зависимости от концентрации лития:

- измерены спектры пропускания и люминесценции;
- измерены показатель преломления и плотность;
- исследован световойход.

Настоящее исследование поддержано совместным грантом РФФИ и Правительства Московской области (проект 14-42-03596 p_центр_a «Разработка и исследование свойств жидкого литийсодержащего сцинтиллятора на основе микроэмульсий»).

Библиографический список

1. Абрамзон, А. А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение / А.А. Абрамзон. — Ленинград : Химия, 1981. — 304 с.
2. Абрамзон, А. А. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества : Справочник / А. А. Абрамзон [и др.]. — Ленинград : Химия, 1984. — 392 с.
3. Береснев, В. И., Марков Ю.Я. Жидкий сцинтиллятор для регистрации нейтронов. Патент RU 2078355.
4. Бруданин, В. Б. Элементосодержащие органические сцинтилляторы / В.Б. Бруданин, И.Б. Немченко // Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройство, применение. — Харьков : ИСМА, 2009. — С. 254—286.
5. Ланге, К. Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение / К.Р. Ланге. — Санкт-Петербург : Профессия, 2004. — 240 с.
6. Немченко, И. Б. Жидкий сцинтиллятор на основе линейного алкилбензола / И.Б. Немченко [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. — 2011. — Т. 8, № 2. — С. 218—227.
7. Плетнев, М. Ю. Поверхностно-активные вещества и композиции : Справочник / М.Ю. Плетнев. — Москва : ООО «Фирма Кламель», 2002. — 194 с.
8. Таблицы физических величин. Справочник : под ред. акад. И.К. Кикоина. — Москва : Атомиздат, 1976. — 1008 с.
9. Юртов, Е. В. Микроэмульсионное выщелачивание меди / Е.В. Юртов, Н.М. Мурашова, А.И. Симонов // Химическая технология. — 2004. — № 8. — С. 35.
10. Ait-Boubker, S. Thermal Neutron Detection and Identification in a Large Volume with a New Lithium-6 Loaded Liquid Scintillator / S. Ait-Boubker [et. al]. // Nucl. Instrum. & Methods. — 1989. — V. A277. — P. 461.
11. Cowan, C. L. Detection of the Free Neutrino: A Confirmation / C.L. Cowan [et al.] // Science. — 1956. — V. 124. — P. 103.

12. Dai S., Kesanli B., Neal J.S. Lithium-Loaded Liquid Scintillators. US Patent 2011/0095231 A1.

13. Fisher, B. M. Fast Neutron Detection ^6Li -loaded Liquid Scintillator / B.M. Fisher [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. — 2011. — V. 646. — P. 126.

14. Greenwood, L. R. ^6Li -loaded Liquid Scintillators with Pulse-Shape Discrimination / L.R. Greenwood, N.R. Chellew, G.A. Zarwell // Rev. Sci. Instrum. — 1979. — V. 50, No 4. — P. 472.

15. Hejwowski, J. Lithium Loaded Liquid Scintillator / J. Hejwowski, A. Szymanski // Rev. Sci. Instrum. — 1961. — V. 32. — P. 1057.

16. Kallmann, H. P. Liquid Scintillators with Heavy Elements / H.P. Kallmann, M. Furst, F.H. Brown // Nucleonics. — 1956. — V. 14, No 4. — P. 48.

17. Ross, H. H. A New Liquid Scintillator for Thermal Neutron Detection / H.H. Ross, R.E. Yerick // Nucl. Sci. and Eng. — 1964. — V. 20. — P. 23.

Поступила в редакцию
22.12.15