

**ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫСВЕЧИВАНИЯ ЖИДКИХ  
СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО  
АЛКИЛБЕНЗОЛА И ПСЕВДОКУМОЛА, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ  
ДЛЯ НЕЙТРИННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ СЛЕДУЮЩЕГО  
ПОКОЛЕНИЯ**

© 2013 г. Н. Б. Лубсандоржиев\*, Л. Б. Безруков\*, Б. К. Лубсандоржиев\*\*,\*\*,  
Р. В. Полещук\*, И. Р. Барабанов\*, Г. Я. Новикова\*, Е. А. Янович\*

\*Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

\*\*Kepler Center for Astro and Particle Physics, University of Tübingen

Auf der Morgenstelle 14, D-72076 Tübingen Germany

Поступила в редакцию 12.04.2012 г.

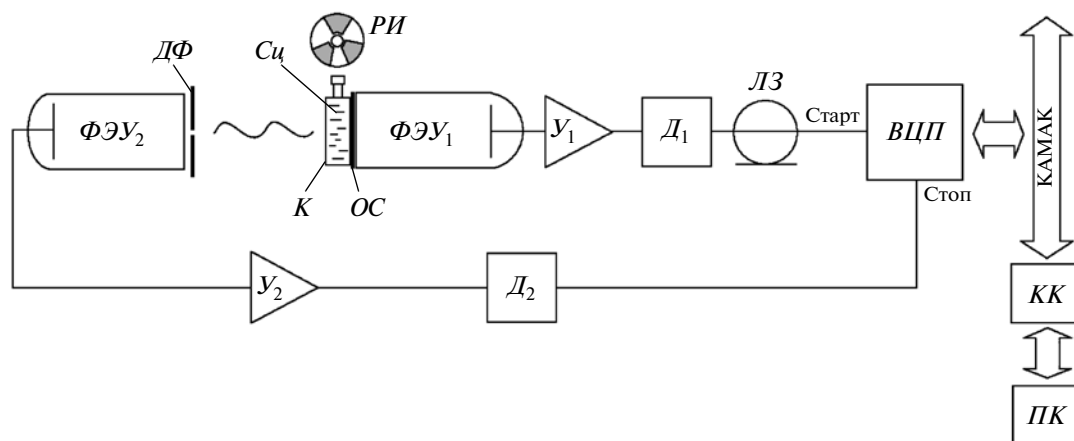
Представлены результаты исследований кинетики свечения жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола (LAB) и псевдокумола (PC) с различными сцинтиллирующими добавками при облучении  $\gamma$ -квантами от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ . Показан сложный многокомпонентный характер сцинтилляционного свечения, характеризующийся постоянными времени высвечивания  $\tau_1 \sim 2.2\text{--}7.0$  нс,  $\tau_2 \sim 4.4\text{--}14.7$  нс,  $\tau_3 \sim 13.8\text{--}68.8$  нс и  $\tau_4 > 120$  нс.

DOI: 10.7868/S0032816213010321

Жидкие сцинтилляторы играют особую роль в истории нейтринной физики. Основным детектирующим элементом в эксперименте Ф. Райнеса и К. Коуэна [1], в котором впервые было зарегистрировано нейтрино, являлся жидкий сцинтиллятор. Авторы этой работы, по-видимому, первыми осознали достоинства жидких сцинтилляторов и успешно их использовали. Несомненным достоинством жидких сцинтилляторов является возможность использования больших объемов сцинтилляторов. Это представляет исключительную важность для современных и будущих крупномасштабных микрокосмофизических экспериментов, для нейтринных экспериментов в особенности. Так, например, в экспериментах с использованием жидких сцинтилляционных детекторов были измерены поток солнечных бериллиевых  $^7\text{Be}$  нейтрино (эксперимент Borexino [2]) и параметры нейтринных осцилляций (эксперименты Chooz [3] и KamLAND [4]). Жидкие сцинтилляторы остаются востребованными и в планирующихся экспериментах следующего поколения. Эксперименты по поиску распада протона и регистрации слабых нейтринных потоков (геонейтрино, вспышки сверхновой и т.д.) требуют создания низкофоновых установок огромных размеров. Следующий этап в детектировании редких событий предполагает создание установок с массой жидкости  $\geq 10000$  т. Немаловажно, что свойства органического сцинтиллятора в плани-

рующихся экспериментах должны удовлетворять возросшим требованиям экологической и пожарной безопасности. Одним из перспективных растворов для приготовления жидкого органического сцинтиллятора является линейный алкилбензол (LAB), который впервые был рассмотрен в рамках проекта SNO+ [5]. Помимо проекта SNO+ этот растворитель используется для приготовления Gd-содержащего сцинтиллятора в экспериментах по поиску осцилляций нейтрино на ядерных реакторах Double-Chooz [6], Daya Bay [7], RENO [8], а также рассматривается возможность применения этого материала в проекте нейтринного эксперимента следующего поколения LENA [9].

Достижения быстрой кинетики сцинтилляционного свечения, высокого световыхода и прозрачности — главные цели при разработке жидкого органического сцинтиллятора. Чем больше зарегистрировано фотонов, тем лучше энергетическое разрешение, и, как следствие, появляется возможность понижения порога регистрации событий и увеличения чувствительности всего эксперимента в целом. При достаточно быстрой кинетике сцинтилляционного свечения появляется возможность пространственного выделения отдельных событий в детекторе, т.е. время высвечивания определяет, в основном, пространственное разрешение детектора. Пространственный анализ является мощным инструментом для иденти-

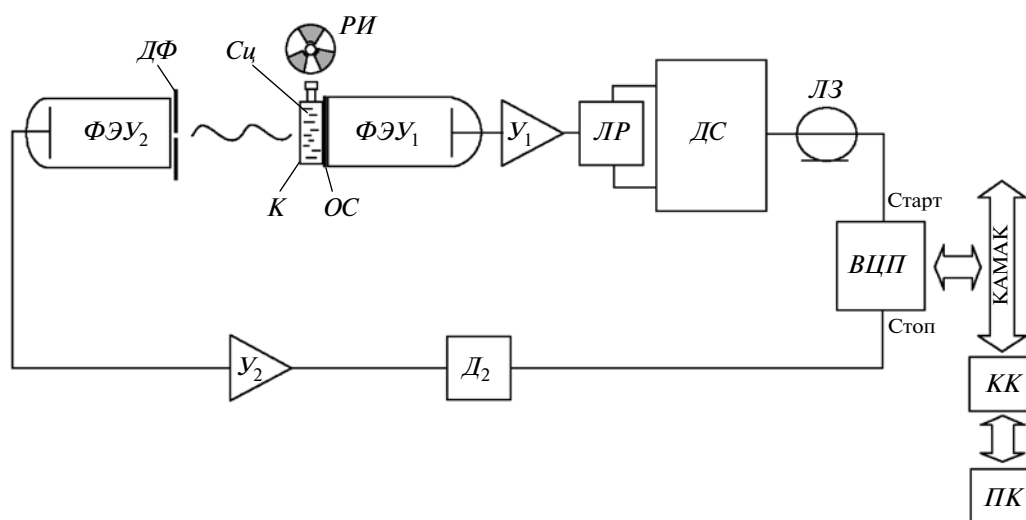


**Рис. 1.** Функциональная схема измерительного стенда для исследования кинетики свечения жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола (ЛАВ) и псевдокумола (РС). *С<sub>ц</sub>* – исследуемый жидкий сцинтиллятор; *К* – кварцевая кювета; *РИ* – радиоактивный источник <sup>137</sup>Cs; *ОС* – оптическая смазка ВС-630; *ДФ* – диафрагма; *ФЭУ<sub>1</sub>* – фотоэлектронный умножитель R6427, *ФЭУ<sub>2</sub>* – XR3112/PA; *У<sub>1</sub>*, *У<sub>2</sub>* – быстродействующие усилители LeCroy 612A; *Д<sub>1</sub>* – формирователь со следящим порогом Canberra 2126; *Д<sub>2</sub>* – дискриминатор импульсов LeCroy 621AL; *ЛЗ* – кабельная линия задержки; *ВЦП* – времяцифровой преобразователь; *КК* – крейт-контроллер КАМАК КК-009; *ПК* – персональный компьютер IBM-PC/AT-486i.

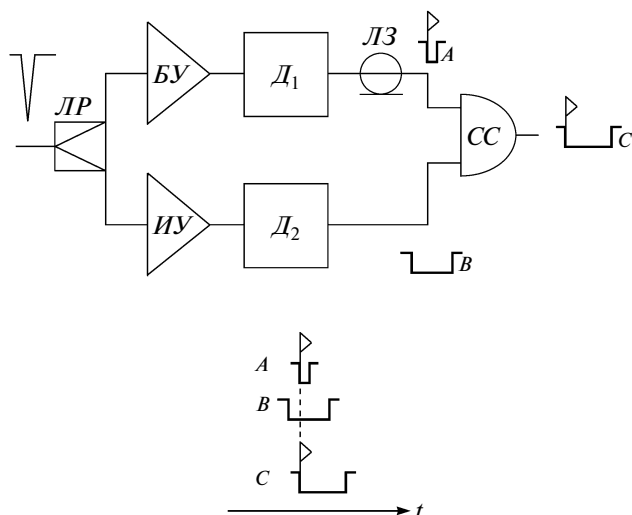
фикации и подавления фоновых событий, когда отбираются события, происходящие только в центральной части детектора. Временной анализ формы импульса позволяет регистрировать сцинтилляционные вспышки, связанные с распадом примесей естественных радиоактивных элементов в сцинтилляторе <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, регистрируя цепочки задержанных совпадений <sup>214</sup>Bi-<sup>214</sup>Po и <sup>212</sup>Bi-<sup>212</sup>Po.

Увеличение концентрации сцинтиллирующих добавок приводит, как правило, к уменьшению времени высвечивания сцинтиллятора. Однако, с другой стороны, рост концентрации активатора

ухудшает прозрачность сцинтиллятора из-за эффекта самопоглощения. Таким образом, сцинтиллятор должен быть оптимизирован для достижения высокого световыхода при одновременной быстрой кинетике свечения. В состав сцинтиллятора может входить активатор или активатор совместно со сместителем спектра – шифтером. Введение спектросмещающей добавки (шифтера) в сцинтиллятор позволяет сдвинуть излучение активатора в более длинноволновую область, где поглощение и рассеяние света существенно меньше. Также в ряде случаев применение шифтера позво-



**Рис. 2.** Функциональная схема измерительного стенда для исследования кинетики свечения жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола (ЛАВ) и псевдокумола (РС) без сцинтиллирующих добавок. *ЛР* – линейный разветвитель импульсов LeCroy 428F; *ДС* – двухплечевая дискриминаторная система.

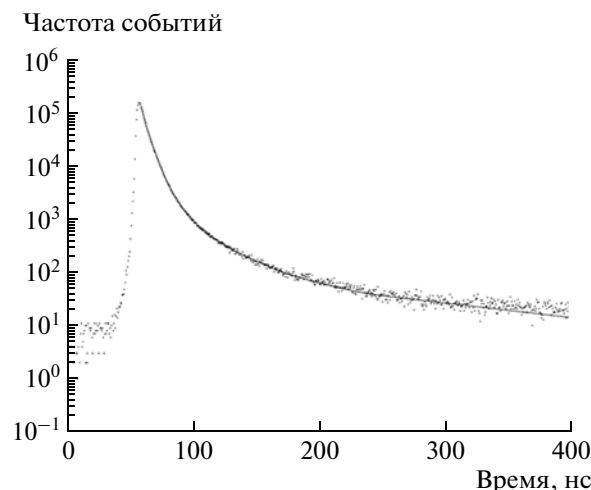


**Рис. 3.** Функциональная схема двухплечевого дискриминатора для исследования кинетики свечения неактивированных жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола (LAB) и псевдокумола (РС). *LP* – линейный разветвитель; *БУ* – быстродействующий усилитель; *ИУ* – интегрирующий усилитель; *Д<sub>1</sub>*, *Д<sub>2</sub>* – дискриминаторы импульсов; *ЛЗ* – линия задержки; *СС* – схема совпадений. Внизу – временная диаграмма работы двухплечевого дискриминатора.

ляет лучше согласовать спектр излучения сцинтиллятора со спектральной чувствительностью используемых в эксперименте фотоэлектронных умножителей.

В данной работе проведены исследования кинетики свечения жидких сцинтилляторов на основе линейного алкилбензола (LAB) и псевдокумола (РС) производства Petresa Canada Inc и ООО “Кинэф” (Кириши Ленинградской обл.) при облучении их  $\gamma$ -квантами от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ . Энергия  $\gamma$ -квантов – 662 кэВ. Измерения проводились методом счета коррелированных во времени фотонов [10, 11].

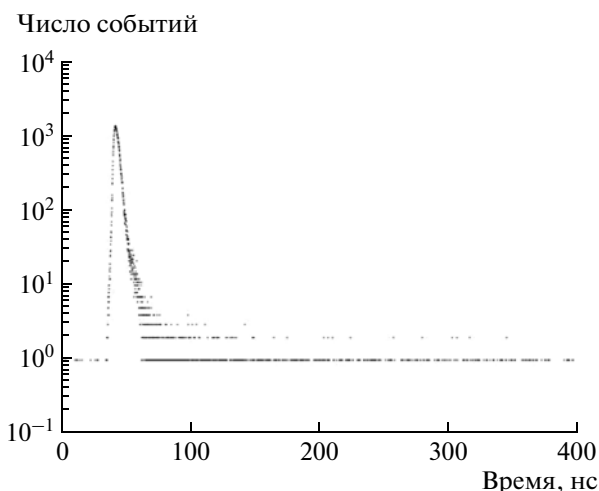
Функциональная схема измерительного стенда для исследования кинетики свечения сцинтилляторов показана на рис. 1. Исследуемый сцинтиллятор *Сц* наливается в кварцевую кювету *К* цилиндрической формы длиной 10 и диаметром 15 мм. Боковая сторона кюветы обернута черной тканью. Радиоактивный источник *РИ* фиксируется над кюветой. Для подавления сигналов от энергичных электронов из источника между источником и кюветой проложена алюминиевая пластина толщиной 2 мм. Кювета с одного торца просматривается быстродействующим фотоэлектронным умножителем  $\PhiЭУ_1$  (R6427 производства фирмы Hamamatsu Photonics). Оптический контакт между входным стеклом фотоумножителя и торцом кюветы осуществляется при помощи оптической смазки *ОС* (Viscon VC-630). Анодные сигналы фотоумножителя  $\PhiЭУ_1$  через быстродействующий



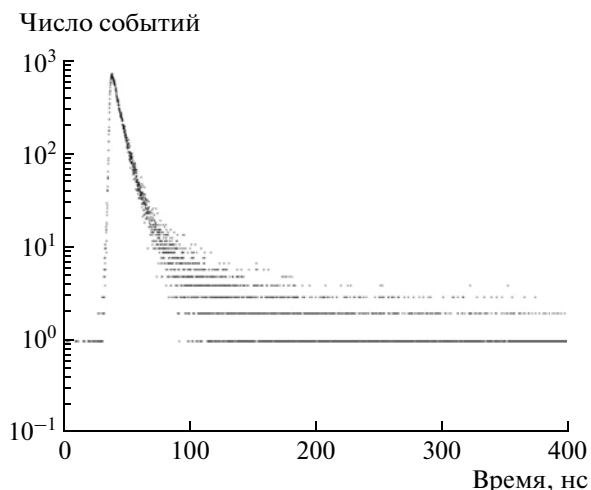
**Рис. 4.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB + PPO (2 г/л).

усилитель  $У_1$  (LeCroy 612A) поступают на вход формирователя со следящим порогом  $Д_1$  (Sanberga 2126), который используется для подавления зависимости положения временной отметки от амплитуды сигнала и выходные сигналы которого после прохождения линии задержки *ЛЗ* служат сигналами *Старт* цифрового преобразователя *ВЦП* (БПТ-12А1) с максимальным диапазоном измеряемых временных интервалов 5 мкс и шириной канала 75 пс. Уровень дискриминации сигналов в  $Д_1$  устанавливается равным  $\sim 3Q_1$ , где  $Q_1$  – средний заряд однофотоэлектронного импульса фотоумножителя  $\PhiЭУ_1$ .

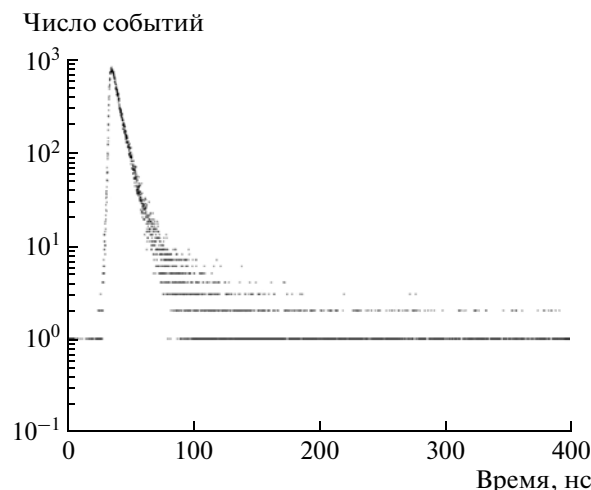
Противоположный торец кюветы со сцинтиллятором просматривается быстродействующим фотоумножителем  $\PhiЭУ_2$  (XP3112/РА производ-



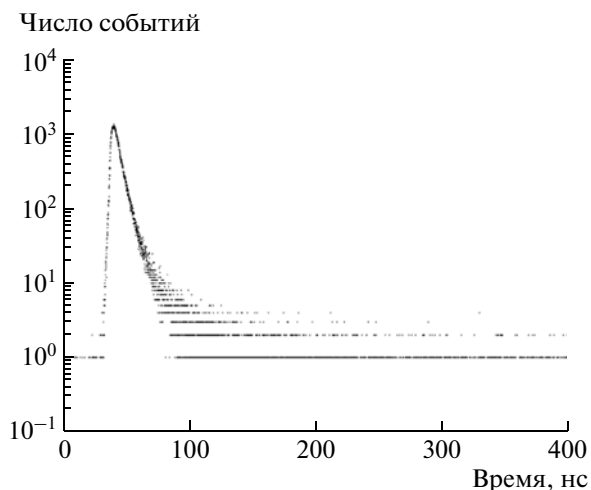
**Рис. 5.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора РС + PPO (2 г/л).



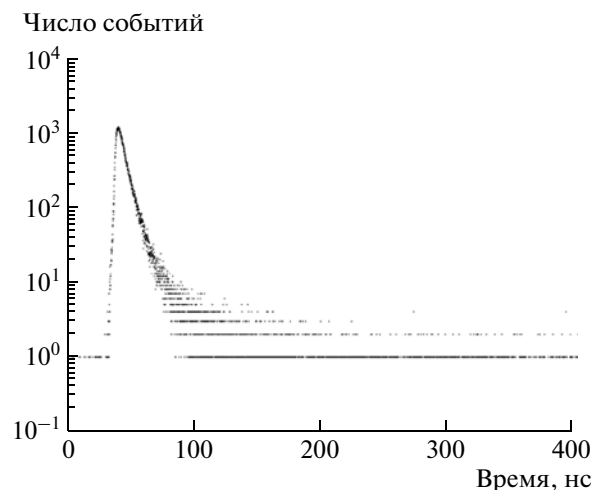
**Рис. 6.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(Petresa) + Butyl-PBD(2г/л), барботированного аргоном.



**Рис. 7.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(Petresa) + BPO(2 г/л).



**Рис. 8.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора 80% LAB(Petresa) + 20% PC + PPO(2 г/л).

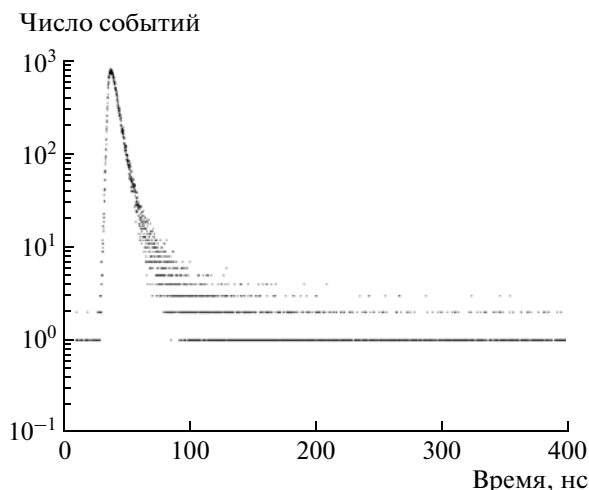


**Рис. 9.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора 80% LAB(Petresa) + 20% PC + BPO(2 г/л).

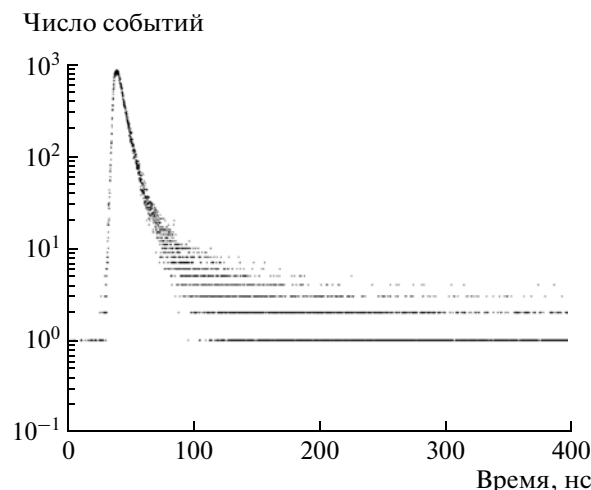
ства фирмы Photonis SAS). Расстояние между торцом кюветы и входным окном этого фотоумножителя и диаметр отверстия диафрагмы  $D\Phi$  регулируются так, чтобы достичь однофотозлектронного уровня засветки фотокатода фотоумножителя. Выходные сигналы  $\Phi ЭУ_2$  после усилителя  $У_2$  (LeCroy 612A) подаются на вход дискриминатора  $D_2$  (LeCroy 621AL). Уровень дискриминации сигналов в  $D_2$  должен быть достаточно низким для того, чтобы с высокой эффективностью регистрировать однофотозлектронные импульсы. Этот уровень устанавливается равным  $\sim 0.25Q_1$ . Выходные сигналы дискриминатора  $D_2$  поступают на вход "Стоп" времяцифрового преобразователя  $ВЦП$ . Результаты преобразования  $ВЦП$  считываются через крейт-контроллер  $КК$  (КК-009) персональ-

ным компьютером  $ПК$  (IBM-PC/AT-486i). Временное разрешение используемых фотоумножителей или, что точнее, разброс времен пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода составляет 650 пс для R6427 и 800 пс для XR3112/PA. Скорости счета импульсов темнового тока обоих фотоумножителей при указанных уровнях дискриминации сигналов не превышают  $300 \text{ с}^{-1}$ .

Для измерения разброса времени прихода сигнала  $Старт$  фотоумножитель  $\Phi ЭУ_2$  устанавливался вплотную к торцу кюветы и притирался к нему оптической смазкой ВС-630. Таким образом измерялось распределение разности времен срабатывания фотоумножителей  $\Phi ЭУ_1$  и  $\Phi ЭУ_2$  по сигналу большой амплитуды от  $\gamma$ -квантов. Ши-



**Рис. 10.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(Petresa) + Gd(0.1%) + PPO(2 г/л) + bis-MSB(50 мг/л), не барботированного аргоном.



**Рис. 11.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(Petresa) + PPO(2 г/л) + bis-MSB(50 мг/л), барботированного аргоном.

рина измеренного распределения не превышает 1 нс (полуширина на полувысоте).

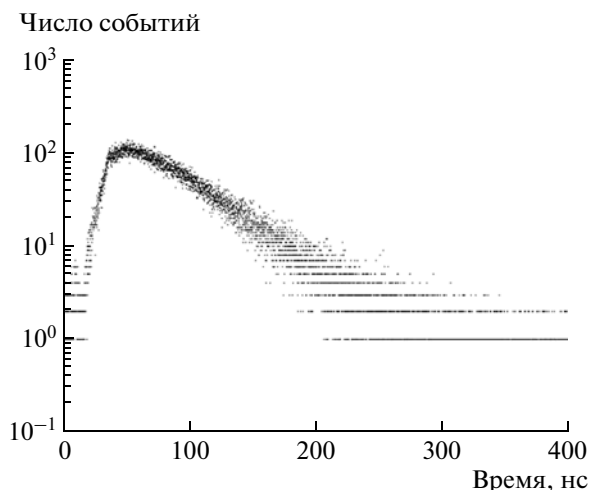
Исследование кинетики свечения неактивированных LAB и PC, т.е. без сцинтиллирующих добавок, представляет собой более сложную экспериментальную задачу. Это связано с малым уровнем сцинтилляционного световыхода и значительным временем высвечивания этих жидкостей. Поэтому для улучшения точности временной привязки к началу сцинтилляционной вспышки в схему измерительного стенда вводится линейный разветвитель импульсов ЛР (LeCroy 428F) и более сложная двухплечевая дискриминаторная система ДС (рис. 2).

Более подробно идея такой дискриминаторной системы поясняется на рис. 3. Входной сигнал разветвляется на два тракта в линейном разветвителе

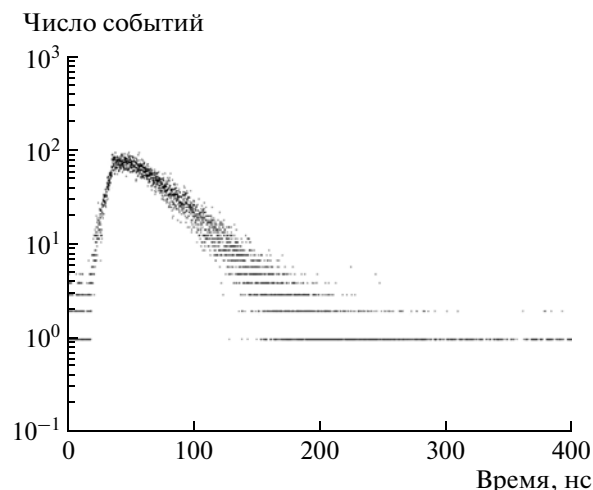
ЛР. В первом, быстром, тракте после быстродействующего токового усилителя БУ сигнал попадает на вход дискриминатора с постоянным порогом  $D_1$ , который вырабатывает так называемую “временную отметку”. Во втором, разрешающем, тракте сигнал интегрируется в усилителе-интеграторе УИ с постоянной интегрирования  $\sim 50$  нс и поступает на вход другого дискриминатора с постоянным порогом  $D_2$ , вырабатывающего разрешающий сигнал на схему совпадений. Сигнал быстрого тракта через линию задержки ЛЗ больше 50 нс поступает на вход схемы совпадений СС. Фронт выходного сигнала схемы совпадений несет временную информацию — временную отметку, временная диаграмма выработки которой также приведена на рис. 3.

Сцинтиллятор	$\tau_1$ , нс	$\tau_2$ , нс	$\tau_3$ , нс
*LAB (Petresa), неактивированный	$51.03 \pm 0.13$	—	—
LAB (Petresa), неактивированный	$38.13 \pm 0.13$	—	—
*LAB (Кинэф), неактивированный	$56.04 \pm 0.15$	—	—
LAB (Кинэф), неактивированный	$37.27 \pm 0.13$	—	—
LAB (Petresa) + PPO(2 г/л)	$5.54 \pm 0.03$	$10.81 \pm 0.13$	$30.03 \pm 0.18$
LAB (Petresa) + PPO(2 г/л) + bis-MSB(50 мг/л)*	$6.27 \pm 0.05$	$14.03 \pm 0.48$	$58.85 \pm 0.82$
*LAB (Petresa) + Butyl-PBD(2 г/л)	$6.84 \pm 0.06$	$13.86 \pm 0.33$	$68.82 \pm 1.10$
LAB(Petresa) + Gd(0.1%) + PPO(2 г/л) + MSB(50 мг/л)	$5.44 \pm 0.04$	$9.92 \pm 0.36$	$36.57 \pm 0.67$
LAB(Petresa) + ВРО(2 г/л)	$6.43 \pm 0.05$	$10.25 \pm 0.31$	$33.16 \pm 0.57$
LAB(80%) + PC(20%) + PPO(2 г/л)	$4.93 \pm 0.04$	$6.53 \pm 0.13$	$16.15 \pm 0.15$
LAB(80%) + PC(20%) + ВРО(2 г/л)	$5.42 \pm 0.05$	$7.22 \pm 0.14$	$18.43 \pm 0.18$
PC + PPO(2 г/л)	$2.23 \pm 0.03$	$4.45 \pm 0.22$	$13.79 \pm 0.28$

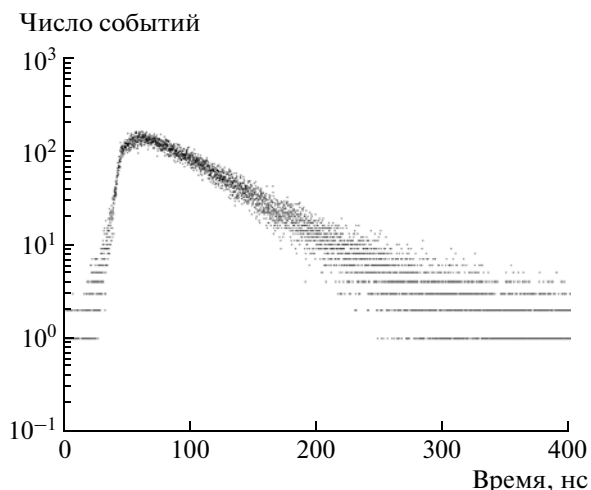
\* Барботирован аргоном.



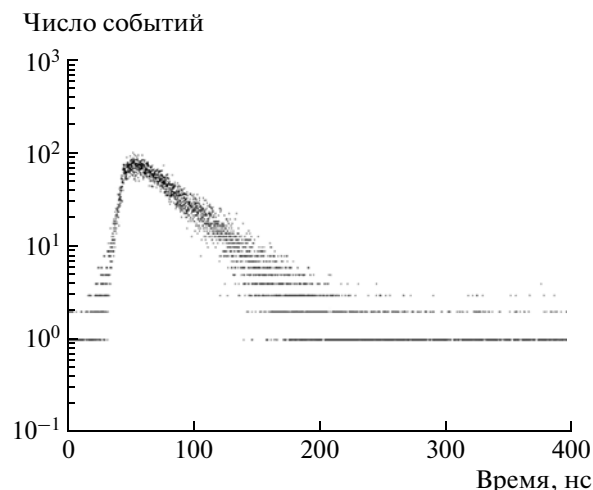
**Рис. 12.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(Petresa), неактивированного, барботированного аргоном.



**Рис. 13.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(Petresa), неактивированного, не барботированного аргоном.



**Рис. 14.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(“Кинеф”), неактивированного, барботированного аргоном.



**Рис. 15.** Кинетика свечения жидкого сцинтиллятора LAB(“Кинеф”), неактивированного, не барботированного аргоном.

При использовании такой схемы дискриминатора удастся осуществить привязку временной отметки к первому фотоэлектрону из серии фотоэлектронов фотоумножителя  $\Phi ЭУ_1$ , образующихся от сцинтилляционной вспышки. Значение этого уровня дискриминации устанавливается равным  $\sim 0.25q_1$ , где  $q_1$  — средний заряд однофотоэлектронного импульса  $\Phi ЭУ_1$ . В разрешающем тракте значение порога устанавливается равным  $\sim 3q_1$ . При этом скорость счета импульсов темнового тока фотоумножителя составляет  $\sim 300 \text{ с}^{-1}$ . Для улучшения точности временной привязки в быстром временном тракте дискриминаторной системы используется формирователь со следящим порогом Canberra 2126.

В общей сложности было исследовано 12 вариантов сцинтилляторов как с различными сцинтиллирующими добавками, так и чистые линейный алкилбензол и псевдокумол без добавок. Результаты измерений представлены в таблице, а названия всех использовавшихся химических материалов приведены в Приложении. Кинетика свечения всех сцинтилляторов с добавками имеют довольно сложный многокомпонентный характер с разными значениями постоянных времени высвечивания. На рис. 4–11 показаны измеренные формы сцинтилляционных сигналов для некоторых вариантов сцинтилляторов. Для всех активированных сцинтилляторов можно выделить четыре компоненты свечения с постоянны-

ми времени высвечивания  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  и  $\tau_4$ . Основная доля сцинтилляционного свечения приходится на компоненту с самой быстрой кинетикой свечения с постоянной времени высвечивания —  $\tau_1$ . Разброс значений  $\tau_1$  лежит в диапазоне 2.2–7.0 нс,  $\tau_2 \sim 4.4$ –14.1 нс,  $\tau_3 \sim 13.8$ –68.8 нс,  $\tau_4 \sim 120$ –200 нс. На рис. 4 показана форма светового сигнала сцинтиллятора на основе LAB производства Petresa со сцинтиллирующей добавкой PPO с концентрацией 2 г/л. Кинетика свечения сцинтиллятора характеризуется постоянными времен высвечивания  $\tau_1 = 5.54 \pm 0.03$  нс,  $\tau_2 = 10.81 \pm 0.13$  нс,  $\tau_3 = 30.03 \pm 0.18$  нс и  $\tau_4 = 139 \pm 15$  нс. Четвертая, самая медленная, компонента вносит весьма незначительный, практически пренебрежимо малый, вклад в общий световыход сцинтиллятора. Кроме того, для измерения постоянной времени высвечивания этой компоненты с приемлемой точностью необходимо проводить либо довольно длительные измерения для накопления достаточной статистики, либо использовать источник с большей активностью. И то, и другое представляет некоторую техническую сложность. В силу этого, мы не будем приводить данные по четвертой компоненте.

Наиболее быстрой кинетикой свечения из измеренных сцинтилляторов обладают сцинтилляторы на основе PC и смеси из PC и LAB с добавкой PPO с концентрацией 2 г/л. Для такого сцинтиллятора постоянные времена высвечивания составляют  $\tau_1 = 2.23 \pm 0.03$  нс,  $\tau_2 = 4,45 \pm 0.22$  нс,  $\tau_3 = 13.79 \pm 0.28$  нс (рис. 5). Самая же медленная кинетика свечения обнаружена у сцинтиллятора на основе LAB (Petresa) с добавкой Butyl-PBD с концентрацией 2 г/л (LAB + Butyl-PBD(2 г/л)):  $\tau_1 = 6.84 \pm 0.06$  нс,  $\tau_2 = 13.86 \pm 0.33$  нс,  $\tau_3 = 68.82 \pm 1.10$  нс (рис. 6). Применение другой широко используемой сцинтилляционной добавки ВРО в сцинтиляторе на основе LAB дает также вполне приемлемый результат с  $\tau_1 = 6.43 \pm 0.05$  нс,  $\tau_2 = 10.25 \pm 0.31$  нс,  $\tau_3 = 33.16 \pm 0.57$  нс (рис. 7).

В некоторых случаях из условий экспериментов возникает необходимость смешивания основ жидких сцинтилляторов для получения необходимого значения плотности сцинтилляторов, как, например, в эксперименте Double-Chooz [6]. На рис. 8 и 9 показаны кинетики свечения сцинтилляторов на основе смеси LAB и PC с сцинтиллирующими добавками PPO и ВРО: 80% LAB (Petresa) + 20% PC + PPO (2 г/л) и 80% LAB (Petresa) + 20% PC + ВРО (2 г/л) с  $\tau_1 = 4.93 \pm 0.04$  нс,  $\tau_2 = 6.53 \pm 0.13$  нс,  $\tau_3 = 16.15 \pm 0.15$  нс и  $\tau_1 = 5.42 \pm 0.05$  нс,  $\tau_2 = 7.22 \pm 0.14$  нс,  $\tau_3 = 18.43 \pm 0.18$  нс соответственно.

Для увеличения эффективности регистрации и выделения нейтринных событий необходимо добавление небольших количеств тяжелых металлов. При больших рабочих объемах сцинтиллято-

ров возникает необходимость введения второй спектросмещающей сцинтиллирующей добавки для увеличения прозрачности сцинтилляторов. Добавление малого количества тяжелого металла Gd (0.1%) и второй, спектросмещающей, добавки bis-MSB (50 мг/л) в LAB не приводит к заметному ухудшению кинетики свечения сцинтилляторов. При этом при барботировании сцинтилляторов аргоном наблюдается некоторое замедление кинетики свечения сцинтилляторов на  $\sim 25\%$  с  $\tau_1 = 5.44 \pm 0.04$  нс,  $\tau_2 = 9.92 \pm 0.36$  нс,  $\tau_3 = 36.57 \pm 0.67$  нс для небарботированного сцинтиллятора до  $\tau_1 = 6.27 \pm 0.05$  нс,  $\tau_2 = 14.03 \pm 0.48$  нс,  $\tau_3 = 58.85 \pm 0.82$  нс для барботированного (рис. 10 и 11 соответственно).

Отдельный интерес представляет кинетика свечения неактивированного LAB, т.е. без всяких сцинтиллирующих добавок. Исследовались LAB от двух производителей — ООО “Кинеф” и Petresa. В силу малого световыхода неактивированного LAB в измерительный стенд были введены изменения (рис. 2 и 3). Исследовались сцинтилляторы, барботированные и небарботированные аргоном. Небарботированные и барботированные LAB от обоих производителей обладают преимущественно однокомпонентным характером свечения. Постоянные времена высвечивания небарботированных LAB от ООО “Кинеф” и Petresa имеют значения  $\tau = 37.27 \pm 0.13$  нс и  $\tau = 38.13 \pm 0.13$  нс соответственно. Барботирование аргоном LAB приводит к увеличению времени высвечивания — постоянные времена высвечивания составляют в этом случае  $\tau = 56.04 \pm 0.15$  нс (ООО “Кинеф”) и  $\tau = 51.03 \pm 0.13$  нс (Petresa). Эффект замедления кинетики сцинтилляционного свечения при барботировании аргоном может быть объяснен тем, что растворенные молекулы кислорода в небарботированных сцинтилляторах служат эффективными центрами тушения сцинтилляционного света в жидкости. Тем самым происходит уменьшение времени высвечивания сцинтиллятора. Молекулы аргона при барботировании уводят молекулы кислорода из жидкости, при этом время высвечивания увеличивается. Кинетика свечения неактивированных LAB, барботированных аргоном и небарботированных, показана на рис. 12–15.

Проведенные измерения показывают, что жидкие сцинтилляторы на основе легкодоступных и недорогих линейного алкилбензола и псевдокумола обладают достаточно быстрой кинетикой свечения для использования в крупномасштабных нейтринных экспериментах следующего поколения. Введение небольшого количества (0.1%) тяжелого металла Gd не ухудшает существенно кинетику свечения исследованных жидких сцинтилляторов.

Авторы выражают свою искреннюю признательность В.Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение рукописи статьи, многочисленные

обсуждения и ценные замечания. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 09-02-00279а и Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.518.11.7051 от 12 мая 2011 года).

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

В статье использовались следующие сокращения химических соединений:

LAB – линейный алкилбензол –  $C_6H_5R$ , где  $R = C_{10}-C_{14}$ ;

PC – псевдокумол 1,2,4-триметилбензол –  $C_9H_{12}$ ;

PPO – 2,5-дифенил-оксазол;

Butyl-PBD – 2-(4-Бифенилил)-5-(4-*t*-бутилфенил)-1,3,4-оксадиазол;

Bis-MSB – *p*-Бис(*o*-метилстирил)-бензол;

BPO – 2-(4-бифенил)-5-фенилоксазол.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cowan C.L., Reines F., Harrison F.B. et al. // Science. 1956. V. 124. № 3212. P. 103.
2. Alimonti G., Arpesella C., Back H. et al. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2009. V. 600. P. 568.
3. Apolloni M., Baldini A., Bemporad C. et al. // Eur. Phys. Journal C. 2003. V. 27. P. 331.
4. Eguchi K., Enomoto S., Furubo K. et al. // Phys. Rev. Lett. 2003. V.90. № 2. P. 021802.
5. O'Keeffe H.M., O'Sullivan E., Chen M.C. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2011. V. 640. P. 119.
6. Ardelier F., Barabanov I., Barrier J.C. et al. arXiv:hep-ex/0405032. 2004.
7. Daya Bay Collaboration. arXiv:hep-ex/0701029v1. 2007.
8. Kim S.-B. // J. Phys.: Conf. Series. 2008. V.120. P.052025.
9. Wurm M., Beacom J.F., Bezrukov L.B. et al. arXiv:1104.5620. 2011.
10. O'Conner D.V., Phillips D. Time-correlated single photon counting. L.: Academic Press, 1984.
11. Becker W. Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques. Berlin–Heidelberg–New York: Springer, 2005.