



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-59

P16-98-59

Л.Н.Зайцев

ЗАВИСИМОСТЬ  
РАДИАЦИОННОГО РЕСУРСА ДЕТЕКТОРОВ  
ОТ РЕЖИМА РАБОТЫ КОЛЛАЙДЕРА

Направлено: the 17th International Conference  
on High Energy Accelerators, 7—12 September 1998,  
JINR, Dubna, Russia

1998

Необходимость исследований облученных полимерных и полупроводниковых материалов вызвана созданием для ЛНС ЦЕРН крупных установок, доступ к которым практически закрыт на весь срок службы порядка 5—10 лет. В этих установках наибольшие радиационные нагрузки приходятся на области вершинных и трековых детекторов, передних адронных и электромагнитных калориметров. При максимальной светимости  $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  они могут достигать  $50 \div 100 \text{ кГр}$  в год.

Априори очевидно, что скintилляторы и спектросмещающие волокна (WLS) не могут выдержать таких нагрузок при жестких требованиях светопотерь ~10%. Поэтому задачи, поставленные в [1], оказались не реализованными. Все тесты для 13 лучших скintилляторов [2], показанные на рис.1, проведены ускоренно, т.е. при очень больших мощностях доз  $\dot{D}$  ( $\text{Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$ ). Провести тесты в области нагрузок ЛНС (рис.1) и повысить на 3 порядка предельную дозу  $D_{\text{lim}}$  ( $\xi$ ) — невозможно. Большие затруднения возникают также и при использовании полупроводниковых детекторов вблизи области взаимодействия пучков.

Поэтому в последнее время развиваются два новых альтернативных направления:

а) радиационные исследования жидких скintилляторов (ж.с.) в капиллярных волокнах с периодическим обновлением ж.с. [2,3];

б) изучение радиорезистентности твердых скintилляторов (т.с.) с новыми добавками, которые способствуют быстрому и полному (на ~100%) спонтанному восстановлению [4,5]. Оба направления, в принципе, могут существенно увеличить ресурс, но требуются поисковые работы не менее трудные, чем в [1].

Ресурс непрерывного облучения, определяющий длительность сеанса:  $t_r = k_3(D_{\text{lim}}/D)$ , где  $k_3$  — коэффициент неопределенности (запаса). Ресурс облучения с перерывами, определяющий срок службы:

$$t_R = f(D_{\text{lim}}, \dot{D}, T, \tau, \delta, \xi \dots),$$

где  $\tau, \delta$  соответственно время и степень восстановления;  $T$  — температура;  $\xi$  — определяющий параметр (световыход —  $L$ ; длина ослабления —  $l$ ; оптическая плотность —  $d$ ; число фотоэлектронов и т.п.).

В настоящей работе в соответствии с методологией [6] проводились наблюдения за фоторадиационным старением т.с. в течение двух лет. Образцы

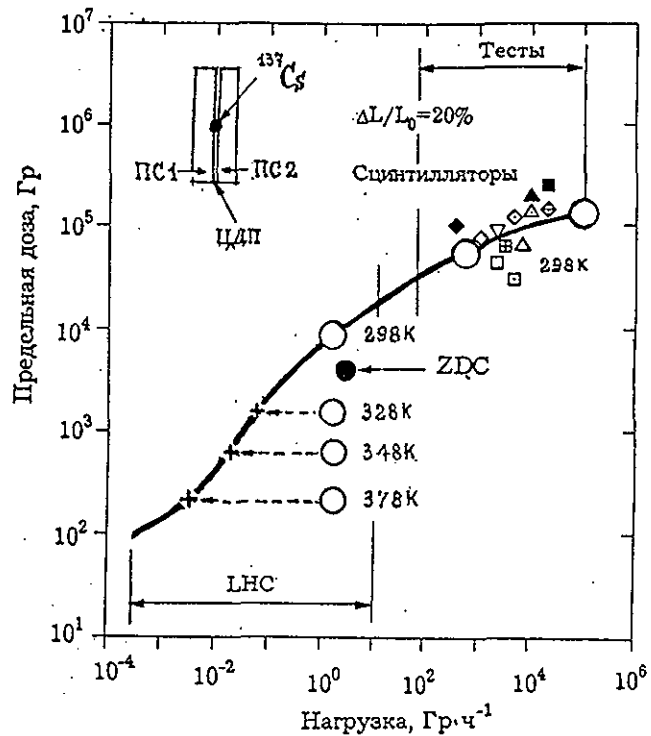


Рис.1. Зависимость предельной дозы от радиационной нагрузки лучших сцинтилляторов (мелкие точки [2]) и образцы ПС1 (см. текст):  
 ○ — наши измерения; ● — ZDC (реальный калориметр [5]); + — расчетные значения на основе экспериментальных данных

т.с. диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм вырезались из пластин т.с. размером 150x150 мм<sup>2</sup>. Повышенное содержание добавок: 3% рТР + 0,04% РОРО обеспечивало минимальное временное разрешение [7] и способствовало защите от деградации матрицы [8]. В некоторые пластины вводилась фотостабилизирующая и антиокислительная добавка типа ССВ [9]. Она практически не изменяла первоначальные характеристики т.с. Все пластины изготавливались методом литья под давлением из гранулированного полистирола марки ПСМ-115.

Источник <sup>137</sup>Cs низкой активности помещался в центре между образцами ПС1 (без добавки ССВ) и ПС2 (с добавкой 1% ССВ), как показано на рис.1. Между образцами находились два цветочных пленочных дозиметра: ЦДП-4-1 толщиной 150 мкм, плотностью 1,2 г·см<sup>-2</sup>; ЦДП-Ф-2 толщиной 75 мкм, плотностью 1,35 г·см<sup>-2</sup>. Первый дозиметр работает в диапазоне доз 10 + 2·10<sup>2</sup> Гр,

второй — в диапазоне доз 10<sup>3</sup> + 5·10<sup>5</sup> Гр. Дозиметры были тщательно отградуированы на α-, β- и γ-источниках, а также в смешанном поле на ускорителе, так как раньше использовались в эксперименте WA-98 (ЦЕРН) при 158 А·ГэВ (Pb—Pb) в калориметре ZDC [10] (см. рис.1). Было рассчитано распределение дозы в образцах по спектрам всех частиц, испущенных <sup>137</sup>Cs (табл.1). В результате получили:  $\dot{D}_{\max} = 1,2 \pm 0,14 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$  в т.с., что на 20% ниже чем в дозиметрах.

Таблица 1. Частицы, испущенные <sup>137</sup>Cs

Частица	Энергия, МэВ		%
	первичн.	вторичн.	
β	1,174	—	5,4
β	0,512	—	94,6
Итого:			100%
Конверс.		0,624	7,80
β	—	0,656	4,37
	—	0,661	0,37
γ	—	0,662	84,1

Предполагая быстрое восстановление образцов после облучения, были организованы экспрессные измерения. Низкая активность источника позволяла его снимать с образцов вручную. Использовались два спектрофотометра СФ-26 — для измерения  $d(\lambda)$ -дозиметров и СФ-20 с двойным монохроматором для измерения спектров поглощения и  $d(\lambda)$ -образцов. Контейнер с облучаемыми образцами находился рядом со спектрофотометрами. В контейнере поддерживалась заданная температура. Восстановление всегда происходило при комнатной температуре (298 К). После каждого цикла облучения дозиметры ЦДП заменялись новыми.

Таким образом, измерялась только одна величина  $d(\lambda)$ . Удобство использования величины оптической плотности — очевидно. Она количественно характеризует свет, поглощенный образцом, вне зависимости от того, по каким каналам идет диссипация возбуждения. Эффект, наблюдаемый в изменении  $d(\lambda)$  после облучения, должен ярче проявиться в характере эмиссионных спектров  $E(\lambda)$  [11]. Погрешность измерения оптической плотности была менее 0,2%.

На рис.2 показан эмиссионный спектр (1), измеренный по методике [8] в специальном (5 мкм) образце состава ПС2. Для возбуждения флуоресценции

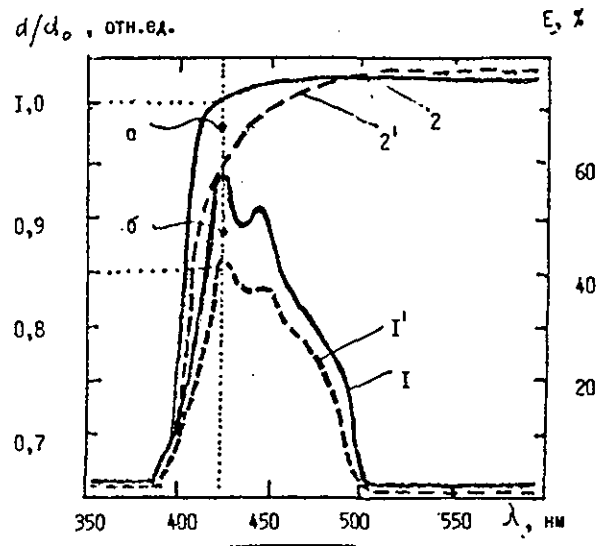


Рис.2. Спектры флуоресценции (1, 1') и пропускания (2, 2'), соответственно, до и после облучения дозой 2,4 кГр при  $T=328$  К в «терминах оптической плотности» для образца ПС2; после восстановления спектр совпадает с (1)

использовалась ртутная лампа. Вероятность поглощения излучения первой добавки (рТР) второй добавкой (РОРОР) мала в том случае, если толщина образца составляет несколько мкм [12,13]. При экспрессных измерениях  $d(\lambda_{\max}) \rightarrow (a+b)$ , где  $\lambda_{\max} = 425$  нм, не разделяются эффекты испускания и пропускания света, но при этом возможно проводить относительные сравнения. При малых дозах (до 4 кГр) сдвига  $\lambda_{\max}$ , как правило, не происходит, а изменяется только величина  $d(\lambda_{\max})$ , причем  $a \gg b$  при  $T=298$  К.

На рис.3 и в табл.2 представлены результаты длительных экспериментальных наблюдений. Видно, что стандартный образец ПС1 хорошо восстанавливается при 298 К (1-й цикл), но сильно деградирует с увеличением  $T$ , несмотря на существенное уменьшение дозы (II—IV циклы). Образец ПС2 с антиоксидантом ССВ, как и ожидалось, значительно полнее и быстрее восстанавливается. Причем стабильность сохраняется после 3-разового повышения температуры. Этот эффект объясняется преобладанием в ПС2 обратимых процессов. Образец ПС1 после V цикла был заменен новым, чтобы в последующих циклах определить величины  $\tau$  и  $\delta$ . Облучение в настоящее время продолжается. Предполагается еще 8—10 циклов, но только при 298 К.

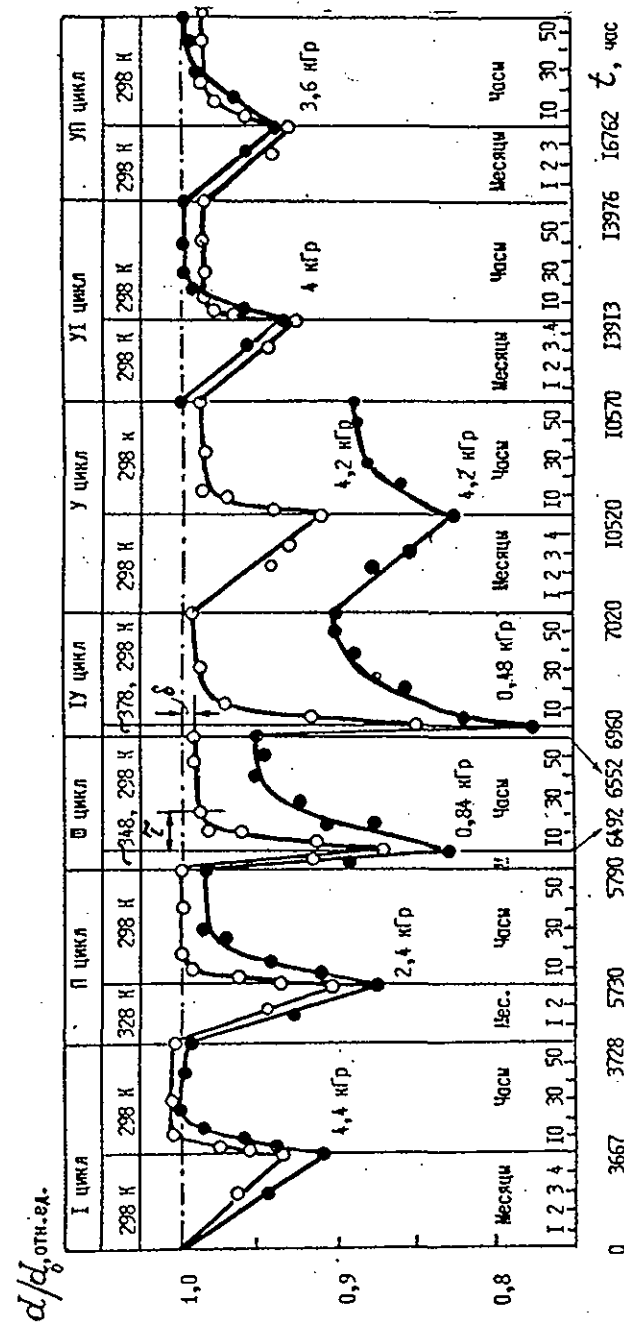


Рис.3. Циклическое облучение и восстановление образцов симтиллаторов: ○ — образец ПС2; ● — образец ПС1

Температурная зависимость  $d/d_0$  в трех циклах была необходима, поскольку только таким способом можно определить  $D_{\text{lim}}(\dot{D})$  при  $10^{-4} \div 10^{-2}$ . Ясно, что для прямых измерений потребовалось бы  $10^6$  часов на один цикл.

Таблица 2. Параметры облучения  $^{137}\text{Cs}$  ( $\dot{D} = 1,2 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) и восстановления образцов ПС1/ПС2

№№ циклов	$t_{\text{обн}}, \text{ч}$	$T, \text{К}$	$D, \text{кГр}$	$\xi, \%$	$\tau, \text{ч}$	$\delta, \%$
I	$3,7 \cdot 10^3$	298	4,4	91/94	24/6	100/104
II	$2,0 \cdot 10^3$	328	2,4	86/90	32/10	98/100
III	$0,7 \cdot 10^3$	348	0,84	81/88	40/16	95/99,6
IV	$9,4 \cdot 10^3$	378	0,48	77/85	49/20	89/99,4
V	$3,5 \cdot 10^3$	298	4,2	82/81	52/8	88/99,5
VI	$3,3 \cdot 10^3$	298	4,0	93**/92	20**/7	100**/99,3
VII	$3,0 \cdot 10^3$	298	3,6	92**/92	22**/7	100**/99,3

\* $\xi = d(\lambda)/d_0(\lambda)$ ; при  $\lambda = 425 \text{ нм}$

\*\*Новый, необлученный образец ПС1

По методике, описанной в [6], вычислялся коэффициент смещения

$$\dot{a} = \exp [E/R(T_3^{-1} - T^{-1})], \quad (1)$$

где  $R$  — газовая постоянная;  $T_3$  — температура эксплуатации (298 К);  $T$  — температура облучения;  $E$  — энергия активации фоторадиационного процесса:  $E = E_1 + E_2$ .

Энергия  $E_1$  при малых дозах облучения обычно близка к энергии активации продолжения цепи превращений макрорадикалов [9]. Энергия, вносимая активными радикалами в фоторадиационные процессы за счет поглощения видимого света, равна

$$E_2 = \varepsilon(G \cdot \dot{D} \cdot \tau_R) x I \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент экстинкции;  $G$  — радиационно-химический выход радикалов;  $\tau_R$  — время жизни радикалов;  $I$  — интенсивность света;  $\varepsilon$  — средняя энергия фотонов;  $x$  — толщина образца. Результаты « $\dot{D} - t - T$ » — суперпозиции показаны на рис.1. Впервые спрогнозированы величины  $D_{\text{lim}}$  при очень низких  $\dot{D}$ , характерных для ЛНС.

При  $\dot{D} = 10^5 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$  (рис.1) первая экспериментальная точка получена в 1986 г. на ЛУЭ (г.Харьков) при  $E_{\text{эл}} = 1,2 \text{ ГэВ}$  и флюенсе  $10^{11} \text{ эл} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Время облучения ~10 ч. Вторая точка при  $\dot{D} = 10^3 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$  измерена в 1992 г. в ОИЯИ на  $^{60}\text{Co}$ . Следует заметить, что эти образцы имели размеры  $150 \times 150 \text{ мм}^2$  и несколько отличались по составу от ПС1, хотя изготавливались по одинаковой технологии (добавки 1,5% рТР + 0,03% РОРОР + 1% (антирады)). Для ориентировочных оценок в табл.3 даны коэффициенты  $k_3$ , входящие в формулу ресурса непрерывного облучения. Рекомендуется их применять для всех типов т.с. и WLS, кроме ж.с.

Таблица 3. Ориентировочные коэффициенты  $k_3$  для сцинтилляторов

$\dot{D}, \text{Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$
$k_3$	1,05	1,02	1	0,15	0,07	0,02	0,006	0,001	0,0007

Жидкие сцинтилляторы должны быть исследованы в аналогичных циклических условиях. Известно, что контакт ж.с. с воздухом даже при больших  $D$  приводил к значительной деградации люминесцентных и оптических характеристик, которые не восстанавливаются даже через 6 месяцев [2].

В заключение следует отметить, что уменьшение времени полного восстановления т.с. и WLS с взаимовязкой сеансов облучения и перерывов — наиболее эффективный путь увеличения ресурса  $t_R$ -детекторов. Что касается ж.с. в капиллярах, то они, по-видимому, могут работать только в вакууме или нейтральной среде [2,3], что существенно усложняет конструкцию детекторов.

На срок службы в обоих случаях влияет режим работы коллайдера: длительность и частота перерывов; функциональная зависимость светимости от времени; время закачки и циркуляции пучков. Конструктивные особенности коллайдера могут также влиять на величины радиационных нагрузок: расположение скреперов и коллиматоров вблизи детектора; размеры и конфигурацию вакуумной камеры на участках внутри установки и др. Эти вопросы определяют стратегию будущей работы коллайдера и установок.

Автор считает своим долгом поблагодарить А.И.Малахова, А.Д.Коваленко, Ю.С.Анисимова, П.И.Зарубина — за поддержку работы, А.А.Астанова, И.А.Сергеева, В.А.Краснова, С.Л.Зайцева, И.В.Немченка, А.В.Белоусова — за большую помощь при измерениях и обработке экспериментальных результатов, а также З.И.Санько — за оформление работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бритвич Г.И., Васильченко В.Г., Лапшин В.Г. — ПТЭ, 1994, № 1, с.75.
2. Васильченко В.Г. и др. — ПТЭ, 1996, № 3, с.58.
3. Васильченко В.Г. и др. — ПТЭ, 1997, № 2, с.3.
4. Зайцев Л.Н. — Новости ОИЯИ, № 4, с.25.
5. Astarov A.A., Zaitsev L.N. — JINR Rapid Commun., No.5[79]-96, p.35.
6. Зайцев Л.Н. — ОИЯИ P14-95-114, Дубна, 1995.
7. Афанасьев С.В. и др. — ОИЯИ Краткие сообщения, 1997, № 7[81]-97, с.45.
8. Шафранов М.Д. — ОИЯИ D13-97-120, Дубна, 1997.
9. Радиационная стойкость органических материалов. — Справочник (под редакцией В.К.Милинчука). М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Astarov A.A., et al. — JINR Rapid Commun., No.3[77], p.47.
11. Дацко В.С. — ПТЭ, 1996, № 3, с.43.
12. Матвеева Е.Н. и др. — ПТЭ, 1970, № 65, с.76.
13. Жильцова Л.Я. и др. — Журнал прикладной спектроскопии, 1971, т.XV, № 12, с.255.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 марта 1998 года.