

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 93-36
ОЭФ,ОРИ

Г.И.Бритвич, В.Г.Васильченко, В.Г.Лаппин

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ
ПЛАСТМАССОВЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Направлено в ПТЭ



Протвино 1993

Аннотация

Бритвич Г.И. и др. Радиационная стойкость пластмассовых сцинтилляторов: Препринт ИФВЭ 93-36. – Протвино, 1993. – 13 с., 4 табл., библиогр.: 38.

В работе представлены новые экспериментальные результаты по изучению радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов и проведен анализ возможных путей ее улучшения до уровня 10 Мрад и более.

Abstract

Britvich G.I. et al. Radiation Hardness of Plastic Scintillators: IHEP Preprint 93-36. – Protvino, 1993. – p. 13, tables 4, refs.: 38.

This paper presents new experimental results on the radiation hardness of plastic scintillators and gives an analyze of possible ways of its improvements to a level of 10 Mrad or even more.

В конце 40-х и начале 50-х годов [1-3] пластмассовые сцинтилляторы (ПСЦ) получили широкое применение в ядерной физике и других областях науки и техники. С этого времени начался процесс синтеза и изучения все новых сцинтиллирующих материалов [4-6]. В последние годы интерес к этой области возрожден нуждами физики высоких энергий [7], и поиски радиационно стойких ПСЦ возобновились во многих институтах. В этой работе представлены новые экспериментальные результаты по изучению радиационной стойкости пластмассовых сцинтилляторов и проведен анализ возможных путей ее улучшения до уровня 10 Мрад и более.

К физике сцинтилляций

Согласно работе [8] ПСЦ является раствором, где в качестве матрицы используется полимер, обладающий сцинтиллирующими свойствами (например, полистирол (ПС) и др.) или несцинтиллирующий полимер, в котором растворено сцинтиллирующее вещество в большой процентной концентрации (например, полиметилметакрилат (ПММА) + нафталин). Для повышения световыхода и улучшения временных характеристик в матрицу вводится (первая) сцинтиллирующая добавка, а для получения нужного спектра излучения сцинтиллятора, т.е. для смещения спектра излучения ПСЦ в область оптимальной чувствительности фотоприемника или высокой прозрачности матрицы, часто вводится спектросмещающий люминофор (вторая добавка).

На первом этапе взаимодействия ионизирующего излучения с ПСЦ происходит возбуждение полимерной матрицы, которое безызлучательно передается первой сцинтилляционной добавке. Роль первой добавки часто играют пара-терфенил (РТР), 2,5-дифенилоксазол (РРО), 2-(4'-t-бутилфенил)-5-(4''-бифенилил)-1,3,4-оксадиазол (bPBD) и др. со спектром поглощения, совпадающим со спектром люминесценции матрицы.

Затем люминесценция от первой добавки излучательным путем передается ко второй добавке (например, 1,4-бис-[2-(5-фенилоксазолил)]-бензол, (РОРОР), 1,4-бис-2 (4-метил-5-фенилоксазолил) бензол (DMPOPOPO) и др.), если этого требует задача. Вторая добавка должна удовлетворять определенным требованиям: спектр поглощения ее должен совпадать со спектром люминесценции первой добавки; иметь высокую квантовую эффективность конверсии света, излучаемой первой добавкой; для многих применений должна иметь короткие времена высвечивания, высокую термическую и фотостойкость и др.

К физике оптических потерь при облучении

При облучении органических спинтилляторов ионизирующим излучением [3-7] в них происходят сложные процессы изменения структуры с появлением активных радикалов и выходом газообразных продуктов радиолиза как из полимера, так и из спинтиллирующих добавок. В результате, падают как световыход, так и прозрачность облученного ПСЦ [9,10]. На указанные характеристики радиационного повреждения спинтилляторов прежде всего оказывают влияние размеры исследуемого образца (толщина) и условия облучения — присутствие воздуха, температура, длительность облучения [9-16] и др. В тоже время они в меньшей степени зависят от типа облучения — электронами, γ -квантами или быстрыми нейтронами. Так как некоторые характеристики облученных ПСЦ восстанавливаются во времени, желательно иметь короткий временной интервал между концом облучения и началом проведения измерений.

Что касается влияния мощности дозы на величину радиационных потерь, то в литературе имеются противоречивые сведения [9,11]. По наблюдению одних авторов, при разных мощностях дозы облучения (если только мощность дозы не настолько велика, что приводит к сильному нагреванию образца) величина оптических потерь зависит только от величины поглощенной дозы D . Однако при малых дозах облучения (≤ 1 Мрад) наблюдаются некоторые зависимости от мощности дозы.

При фиксированных условиях проведения измерений величину световыхода до облучения обозначим L_0 , а после облучения — L . Зависимость отношения L_0/L сразу после облучения от D для ПСЦ на основе винилароматических полимеров (ПС, поливинилтолуола (ПВТ), поливинилсилола (ПВК) и др.) в некотором приближении линейна [17,18] при небольших дозах облучения. Заметим, что аналогичные зависимости имеют место

и для органических кристаллов [19] (антрацен, нафталин, РТР, стильбен и др.).

В процессе проведения поисковых работ существует необходимость сравнения радиационной стойкости широкого класса материалов, включающего в себя и просто оптически прозрачные материалы. Нам неизвестно общепринятое определение радиационной стойкости прозрачных материалов. Для многих применений (ядерная физика и физика высоких энергий) удобно принять за радиационную стойкость дозу D , после поглошения которой образец толщиной 5÷10 мм теряет в среднем $\Delta T \cong 10\%$ своей прозрачности (или $\Delta L/L_0 \cong 10\%$ своего световыхода) в области длин волн, начиная от коротковолновой границы пропускания λ_{min} и до $\lambda \cong 700$ нм. Это определение позволяет адекватно оценить относительную радиационную стойкость материалов, когда эти измерения проведены в фиксированных условиях, и требует коррекции при сравнении опубликованных результатов, которые были получены в разных условиях.

При выборе условий проведения измерений радиационной стойкости прежде всего принимаются во внимание предлагаемые условия эксплуатации материалов. Если не оговорено особо, то воздушная среда и является обычной средой эксплуатации сцинтилляторов. Однако для многих ПСЦ, подвергаемых облучению, эта среда является исключительно жестким условием. В результате этим определяются как сами значения радиационной стойкости, так и выбор материалов.

Измерения радиационной стойкости наших материалов проводились в потоке γ -квантов от радиоактивных источников ^{137}Cs в установке "Стебель" с мощностью дозы ~ 6 рад/с в воздушной среде при комнатной температуре. Образцы имели размеры: диаметр 30 мм и толщину 5 мм. Измерение оптических и люминесцентных характеристик облученных образцов проводилось через несколько часов окончания облучения.

Для определения световыхода L использовался ФЭУ-110 (с мультищелочным фотокатодом). Сцинтилляция в образцах возбуждалась с помощью радиоактивного источника β -частиц ^{90}Sr . Образец и источник помещались на входное окно ФЭУ, и измерялся фототок. Определение световыхода образцов производилось путем сравнения их фототока с фототоком от образцового сцинтиллятора на основе ПС (2% РТР + 0,025% РОРОР), световыход которого принимался за 100%. В настоящее время сформулировались следующие основные направления поиска радиационно стойких материалов.

Повышение радиационной стойкости матрицы

Известно, что под действием ионизирующего излучения некоторые типы изменений в структуре матриц, продукты радиолитического распада матриц сцинтилляторов приводят к появлению линий поглощения, в основном расположенных в ультрафиолетовой и синей частях спектра [5]. Заметим, что в этой области находятся спектры излучения таких часто применяемых первых добавок как РТР, РРО, bPBD и др., то это приводит как к уменьшению интенсивности сцинтилляций, так и к увеличению поглощения. Эти изменения можно разделить на два типа — устойчивые и неустойчивые. Неустойчивые центры окрашивания, изменения в структуре матриц и продукты радиолитического распада со временем претерпевают восстановление или дезактивацию и гибнут. Поэтому происходит относительно быстрое (в течение нескольких дней) частичное восстановление прозрачности и световых выходов ПСЦ. Устойчивые центры окрашивания могут сохраняться длительное время.

Известно, что наименьшей радиационной стойкостью обладают сцинтилляторы на основе ПММА. Так, по нашим измерениям, для образцов сцинтилляторов на основе ПММА + 10% нафталина + 2% РРО + 0,02% РОРОР (толщиной 5 мм) после получения дозы 0,1 Мрад наблюдается уменьшение относительного выхода света L/L_0 до уровня $\cong 60\%$. Полистирол является дешевой основой большого класса сцинтилляторов с лучшими, чем у ПММА, радиационными свойствами, однако повышение требований к радиационным свойствам ПСЦ в последнее время сделали и его характеристики недостаточными.

Дальнейший прогресс в радиационной стойкости может быть связан с использованием матриц, которые более устойчивы к воздействию облучения (т.е. таких, которые имеют множество метильных, фенильных, винильных и других групп с высокими потенциалами связи в звеньях соединения). Так, в работе [17] представлены результаты исследования радиационной стойкости группы перспективных матриц: поли-2,4-диметилстирол, сополимеры полистирола и др.

Надо отметить перспективность использования кремнеорганических соединений в качестве матриц сцинтилляторов. Мы провели исследование некоторых сцинтилляторов на кремнеорганической основе СИЭЛ [20]. Результаты измерений радиационной стойкости сцинтилляторов с различными основами представлены в табл.1.

В последнее время были найдены некоторые кремнеорганические соединения (на основе полисилоксанов), которые показали более высокую радиационную стойкость (40 Мрад и выше) в нейтральной атмосфере

Таблица 1. Радиационная стойкость некоторых матриц сцинтилляторов

	Сцинтилляторы	L_0 , %	L/L_0 , 10 Мрад, %	L/L_0 после 23 дней восст., %
1	ПС + 2% РТР + 0,025% РОРОР	100	23	52
2	ПВТ + 2% РТР + 0,01% РОРОР	89	35	45
3	СИЭЛ + 2% РРО + 0,01% РОРОР	32	25	40

(в атмосфере азота). [21-23], чем широко применяемые органические сцинтилляторы на основе ПВТ, ПС, ПММА и др. Однако эти материалы имеют свои недостатки: плохо растворяют сцинтиллирующие добавки (из-за этого имеют меньший световыход), обладают невысокими механическими свойствами и др. Заметим, что в воздушной среде радиационная стойкость указанных материалов значительно ниже и становится сравнимой с обычными сцинтилляторами.

Повышение радиационной стойкости путем подбора первой добавки

Многие первые добавки (РТР), облученные в отсутствие растворителя, выдерживают дозу до 100 Мрад [24]. В то же время заметное падение световыхода сцинтилляторов на основе ПС наблюдается уже при дозах в несколько Мрад. Падение световыхода ПСЦ может быть обусловлено воздействием на добавки продуктов радиолиза полимера, а также падением прозрачности матрицы в области сцинтилляций добавок. Результаты измерений радиационной стойкости ПС-сцинтилляторов с некоторыми первичными добавками представлены в табл.2.

Наши измерения показывают, что РТР является пока самой радиационно стойкой первой добавкой в ПСЦ. В соответствии с работой [17] можно надеяться, что переход от широко используемой первой добавкой РТР на более стойкие и хорошо растворимые в перспективных матрицах производные кватерфенила улучшит радиационную стойкость сцинтилляторов.

Таблица 2. Влияние некоторых первичных добавок на радиационную стойкость ПС-сцинтилляторов

	Сцинтилляторы	L_0 , %	L/L_0 , 10 Мрад, %	L/L_0 после 23 дней восст., %
1	2% РТР + 0,025% РОРОР	100	23	52
2	2% бРВД + 0,025% РОРОР	104	25	50
3	1,5% РРО + 0,01% РОРОР	85	15	43

Другое направление связано с поиском первых добавок с большим стоксовым сдвигом [25-28], при котором процесс переизлучения ультрафиолетовой люминесценции матрицы (максимум спектра излучения $\lambda_{изл.} = 330$ нм) происходил бы в один шаг в удобную для регистрации область спектра, минуя область сильного поглощения макрорадикалов $\lambda_{погл.} = 320 \div 370$ нм [17], а не в два шага как в обычном сцинтилляторе. С этой целью были спробованы различные сцинтилляционные добавки с большим стоксовым сдвигом: 3-гидроксифлавои (ЗНФ) [25], 1-фенил-3-мезитил-2-пиразолин (ФМР) [26], 2-(2'-гидроксифенил) — бензотиазол (НВТ) [27], 2,2'-бипиридин-3,3'-диол (ВРД) [28]. Однако наличие большого стоксового сдвига еще не гарантирует получение высокой радиационной стойкости.

Первичная добавка ЗНФ действительно улучшает радиационную стойкость ПСЦ, но оказалось, что в общем случае величина стоксового сдвига не связана с радиационной стойкостью ПСЦ. Например, сцинтилляционная добавка Х25 (производная от нафтолового ангидрида) повышает радиационную стойкость ПСЦ [18] до уровня, характерного для ЗНФ, хотя имеет обычную величину стоксового сдвига. В то же время некоторые сцинтиллирующие добавки [18], представляющие собой производные от бензооксазола с максимумами спектров поглощения и излучения $\lambda_{погл.} = 340$ нм, $\lambda_{изл.} = 490$ нм соответственно и аналогичным стоксовым сдвигом, как у ЗНФ ($\lambda_{погл.} = 350$ нм, $\lambda_{изл.} = 530$ нм), дают пониженную радиационную стойкость. Так, ПСЦ на основе ПС с этими добавками после дозы γ -излучения 10 Мрад показали $L/L_0 \cong 20\%$ сразу после облучения, что даже ниже аналогичной характеристики для ПСЦ № 1 из табл.2.

Как дальнейшее развитие этого направления следует рассматривать обсуждаемую сейчас новую технологию введения сцинтиллирующей добавки (молекулы) прямо в полимерную цепь матрицы [11]. Кроме того,

такая матрица может обеспечить повышенный световыход ПСЦ благодаря более эффективному механизму безрадиационной передачи возбуждения к добавке.

Повышение радиационной стойкости путем подбора второй добавки

В настоящее время поиску новых радиационно стойких вторых добавок посвящено значительное число работ [16,18,30-32]. Поиск радиационно стойких вторых добавок часто приходится вести при условии достижения высокой эффективности конверсии определенного первичного излучения, что требует согласования спектра люминесценции первой добавки со спектром поглощения второй. Иногда требуется обеспечение коротких времен высвечивания второй добавкой. Результаты некоторых измерений [18] представлены в табл.3.

Таблица 3. Влияние некоторых вторых добавок на радиационную стойкость ПС-сцинтилляторов

	Сцинтилляторы	L_0 , %	L/L_0 , 10 Мрад,	L/L_0 после 23 дней восст.,
1	2% РТР + 0,025% РОРОР	100	23	52
2	2% РТР + 0,025% МЗНФ	59	48	56
3	2% РТР + 0,025% ЗНФ	50	50	58
4	2% РТР + 0,25% Х25	78	53	58
5	2% РТР + 0,025% Х31	85	47	55

Здесь МЗНФ обозначает 2-(4'-метоксифенил)-3-гидроксифлавоон, а Х31 — производную от нафталимиды. Заметим, что добавки № 1-2 в табл.3 имеют максимумы спектров излучения $\lambda_{изл.} = 420 - 430$ нм, а добавки № 3-5 имеют $\lambda_{изл.} = 500 - 530$ нм. Из табл.3 видно, что добавки ЗНФ, Х25, Х31 обеспечивают сцинтилляторам на основе ПС наибольшую радиационную стойкость. Отметим некоторые перспективные добавки, которые могут улучшить радиационную стойкость ПСЦ: ДМРОРОР, 1,1',4,4' — тетрафенилбутандиен, 2,2'-диметокси-1,4-дистирилбензол и др.

Анализируя результаты работы [18], можно заметить, что радиационные стойкости ПСЦ, в которых произведена замена сцинтиллирующих добавок на их производные, имеют близкие значения. Было замечено, что в большой группе матриц [17] наибольшей радиационной стойкостью обладают полифенилы, а наименьшей — добавки с оксазольными-1,3 и

пирозолиновыми Δ^2 -циклами. Эти наблюдения позволяют упростить процедуру поиска новых радиационно стойких добавок.

Использование антирадиационных добавок

Для многих применений лучшим решением было бы сохранить дешевую полистирольную основу и попытаться улучшить свойства сцинтилляторов путем введения определенных добавок: стабилизаторов, пластификаторов и др. Еще один путь улучшения радиационной стойкости ПСЦ — поиск так называемых антирадиационных добавок — дешевых веществ, повышающих радиационную стойкость ПСЦ [18,33]. Необходимыми свойствами часто обладают многие органические соединения с наличием фенильных и метильных групп в их структуре. Основные результаты некоторых наших измерений представлены в табл.4.

Таблица 4. Влияние некоторых органических добавок на радиационную стойкость ПС-сцинтилляторов

	Сцинтилляторы	L_0 , %	L/L_0 , 10 Мрад, %	L/L_0 после 23 дней восст., %
1	ПС + 1,5% РТР + 0,01% РОРОР + 2% Толуола	97-98	31	54
2	ПС + 2% РТР + 0,02% РОРОР + 10% Толуола	97-98	37	77
3	ПС + 2% РТР + 0,02% РОРОР + 10% РРО + 5% Нафталина	66	58	75
4	ПС + 1,5% РТР + 0,01% РОРОР + 2% Пара-изопропилдифенила	98-99	30	50
5	ПС + 2% РТР + 0,02% РОРОР + 10% Пара-изопропилдифенила	80	41	64
6	ПС + 2% РТР + 1% Стильбена	30	22	28
7	ПС + 1,5% РТР + 0,01% РОРОР + 10% стильбена	20	59	66

Из табл.4 видно, что для достижения заметного уровня радиационной стойкости необходимо вводить высокие концентрации добавок, которые изменяют механические свойства ПСЦ. Например в работе [33], введением большой концентрации нафталина в ПММА (15% нафталина + 0,4% РОРОР) удалось поднять радиационную стойкость такого сцинтиллятора выше радиационной стойкости ПСЦ № 1 из табл.3. Однако введение высоких концентраций добавок в полистирольную матрицу, близких к пределу

растворимости следует производить с осторожностью, так как возможно помутнение образца с течением времени.

Более действенными антирадиационными добавками для ПС, по данным [17], является винилдифенил (ВД) и также дифенил (ДФ) [34]. Однако ВД и ДФ больше повышают устойчивость к фотооблучению, чем к облучению γ -квантами (в работе [33] использовалась концентрация 1% ДФ или ВД, и достигнутые уровни повышения радиационной стойкости сравнимы со значениями из табл.3). Перспективными антирадиационными добавками могут оказаться: 1,4-нафтохинон, N-фенил-N'-o-толилэтилендиамин, N,N'-дифенил-p-фенилендиамин и др.

Повышение радиационной стойкости путем улучшения структуры матриц

По нашим измерениям на радиационную стойкость ПСЦ на основе ПС не оказывает существенного влияния средний молекулярный вес ПС, который в наших опытах менялся от 100 до 1000 тыс. [35]. В то же время радиационная стойкость различных образцов ПСЦ с одинаковым составом (например, состав № 1 из табл.3) зависит от размеров полимеризуемого блока, т.е. от ширины распределения (дисперсии) молекулярных весов ПС в блоке [35]. Так, при уменьшении размеров полимеризуемого блока с $\phi 300 \times 500 \text{ мм}^3$ до $\phi 5 \times 40 \text{ мм}^3$, радиационная стойкость сцинтилляторов (имеющих состав № 1 из табл.3) возросла в 5 раз.

Уменьшение ширины распределения молекулярных весов в ПС-блоках приводит к уменьшению ячеистости структуры ПС-матрицы, т.е. к улучшению радиационной стойкости и объемной прозрачности образцов. На это указывает и обнаруженная в работе [35] повышенная радиационная стойкость сцинтиллятора на основе гранулированного ПС марки ПСМ-115 (использовались добавки: 1,5% РТР + 0,05% РОРОР).

Разные образцы с одинаковой основой и составом, облученные в одинаковых условиях, часто показывают флуктуации радиационной стойкости [18,35]. Так, для сцинтилляторов на основе ПС (полимеризованных в блоке) и составом 2% РТР + 0,025% РОРОР после дозы 2,3 Мрад величина L/L_0 изменяется от 50 до 70% сразу после облучения. Различными у этих образцов могут быть: неконтролируемая величина примеси растворенного кислорода; степень ветвления молекул полистирола и др. Выяснение причин, вызывающих разброс в величине L/L_0 , указывает на другие возможности улучшения радиационной стойкости ПСЦ.

Улучшение радиационной стойкости путем ускорения процессов восстановления

Приводимые в работах [5,9,17,18,36-38] значения скоростей восстановления радиационных повреждений показывают их значительное различие (в диапазоне от 1-2 до 20-25 дней) для сцинтилляторов на основе ПС. Измерения показали, что на скорость и процент восстановления радиационных повреждений оказывает значительное влияние температура окружающей среды, присутствие в ней кислорода, температура стеклования материала, наличие металльных групп в составе соединений, составляющих как матрицу сцинтиллятора, так и его добавки и др. В настоящее время исследования влияния всех этих факторов с целью поиска путей ускорения процессов восстановления в ПСЦ активно ведутся, что позволяет выделить их в отдельное направление по улучшению радиационной стойкости детекторов частиц на основе органических сцинтилляторов при наборе дозы в течение длительного времени.

Заключение

Приведенные выше экспериментальные результаты показывают, что радиационная стойкость ПСЦ определяется многими факторами. В работе описаны основные направления возможного улучшения радиационной стойкости ПСЦ. Здесь важно отметить, что улучшение радиационной стойкости прямо связано с повышением прозрачности, увеличением световых выходов, улучшением механических и других характеристик, т.е. с улучшением основных характеристик органических сцинтилляторов, в котором заинтересован широкий круг пользователей.

Выдвигаемая в настоящее время задача — создание ПСЦ с радиационной стойкостью > 10 Мрад/год, представляет собой тяжелую, но разрешимую задачу. Проводя поиски только в одном направлении, трудно надеяться на достижение желаемого результата в таком комплексном явлении, как радиационная стойкость, однако использование нескольких подходов позволит выйти на желаемый уровень.

Авторы выражают свою глубокую благодарность А.И.Пересыпкину и В.К.Семенову за обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] Forster T. // Z. Naturforsch. Teil. 1949. A4. P.321.
- [2] Schorr M.G. and Torney F.L. // Physical Review. 1950. V.80. No. 1. P.474.
- [3] Black A. // Phyl. Mag. 1953. V.44. P.263.
- [4] Sharn C.F. // J. Chem. Phy. 1961. V.34. P.240.
- [5] Bezuglii V.D. and Nagornaya L.L. // J. Nuc. Eng. 1965. V.19. P.490.
- [6] Oldham G. and Ware A.R. // Rad. Eff. 1975. V.26. P.95.
- [7] Marini G., Donatelli I., Nigro A. et al. – Preprint CERN 85-08. Geneve, 1985.
- [8] Brooks F.D. // Nucl. Instr. Methods. 1979. V.162. P.477.
- [9] Wick K., Paul D., Schroder P. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1991. V.B61. P.472.
- [10] Calcagno L., Compagnini G. and Foti G. // Nucl. Instr. Methods. 1992. V.B65. P.413.
- [11] Zorn C. // IEEE Trans. 1990. NS-37, № 2. P.504.
- [12] Sirios Y. and Wigmans R. // Nucl. Instr. Methods. 1985. V.A240. P.262.
- [13] Zorn C., Bowen M., Majewski S. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1989. V.A276. P.58.
- [14] Johnson K.F. and Whitaker H.L. // Nucl. Instr. Methods. 1991. V.A301. P.372.
- [15] Acosta D., DeSaivo R., Hartjes F.G. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1991. V.B62. P.116.
- [16] Bross A.D., Pla-Dalmau A., Baumbaugh B. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1991. V.A307. P.35.
- [17] Гундер О.А. и Коба В.С. // Химия высоких энергий. 1974. Т.8. С.83; Гундер О.А. – Препринт ИМК-91-15. Институт монокристаллов, Харьков, 1991.

- [18] Britvich G.I., Peresypkin A.I., Rykalin V.I. et al. — Preprint IHEP 91-187. Protvino, 1991.
- [19] Black F.A. // Philosophical Magazine. 1953. V.44. № 350. P.265.
- [20] Алексеева Е.И., Кравченко В.Б., Милявский Ю.С. и др. — Препринт ИРЭ № 8 (426). Москва, 1985.
- [21] Bowen M., Majewski S., Pettey D. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1989. V.A276. P.391.
- [22] Feygelman V.M., Walker J.K. and Harman J.P. // Nucl. Instr. Methods. 1990. V.A290. P.131.
- [23] Harmon J.P., Gaynor J., Feygelman V. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1991. V.B53. P.309.
- [24] Bross A.D. and Pla-Dalman A. — Preprint FERMILAB — Pub — 91/308, Batavia, 1991.
- [25] Zorn C., Bowen M., Majewski S. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1988. V.A273. P.108.
- [26] Majewski S., Bowen M., Szabatan J. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1989. V.A281. P.497.
- [27] Bross A.D. // Nucl. Instr. Methods. 1990. V.A295. P.315.
- [28] Kennedy C., Baumbaugh B., Ditmire T. et al. // IEEE Trans. 1990. NS-37. No. 2. P.144.
- [29] Ambrosio C.D., Leutz H., Tailhardat et al. // Nucl. Instr. Methods. 1991. V.A307. P.430.
- [30] Zorn C., Bowen M., Majewski S. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1988. V.A271. P.701.
- [31] Feygelman V.M., Walker J.K. and Harman J.P. // Nucl. Instr. Methods. 1990. V.A295. P.94.
- [32] Hasegawa T., Hazumi M., Kasai S. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1992. V.A311. P.498.

- [33] Малиновская С.А. Пластмассовые сцинтилляторы на основе акриловых полимеров./Диссертация на соиск. уч. ст. канд. хим. наук. — ВНИИ монокристаллов, Харьков, 1970.
- [34] Гундер О.А. и Коба В.С. // Радиохимия. 1969. Т.11, вып.1. С.119–122.
- [35] Brekhovskikh V.V., Gladyshev V.A., Lapshin V.G. et al. — Preprint ИИЕР 91–164. Protvino, 1991; ПТЭ. 1992. №6. С.95.
- [36] Majewski S., Bowen M., Zorn C. et al. // Nucl. Instr. Methods. 1989. V.A281. P.500.
- [37] Bonamy P., Ernwein J., Gauthereau D. et al. — Preprint DPhPE 91–03 Saclay, 1991.
- [38] Ernwein J. — Preprint DPhPE 91–14. Saclay, 1991.

Рукопись поступила 11 марта 1993 года.

Г.И.Бритвич и др.

Радиационная стойкость пластмассовых сцинтилляторов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L^AT_EX.

Редактор Н.В.Ежеда. Технический редактор Л.П.Тимкина.

Подписано к печати 12.03.1993 г.

Формат 60 × 90/16.

Офсетная печать. Печ.л. 0,81. Уч.-изд.л. 0,95. Тираж 230. Заказ 698.

Индекс 3649.

Цена 49 руб.

Институт физики высоких энергий, 142284, Протвино Московской обл.

49 руб.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 93-36, ИФВЭ, 1993
