

Изучение радиационной стойкости органических пластических сцинтилляторов

В. В. Устинов,^{*} Е. В. Сухов,[†] С. В. Афанасьев,[‡] Д. Г. Сакулин[§]

Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

(Статья поступила 19.06.2019; Подписана в печать 17.07.2019)

Проведены исследования радиационной стойкости органических пластических сцинтилляторов UPS-923A, SCSN-81, SC-301 и SC-307 на основе полистирола, и сцинтилляторов BC-408 и EJ-260 на основе поливинилтолуола. Изучены свойства облученных отражателей Tyvek и ESR; покрытий Paint+TiO₂, PMS+TiO₂ и Epoxy+TiO₂. Результаты исследований используются для создания радиационно-стойкого торцевого адронного калориметра эксперимента CMS (Compact Muon Solenoid) на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. Спектрометр CMS в настоящее время модернизируется для исследования бозона Хиггса в условиях высокой светимости.

PACS: 29.40.Mc

УДК: 539.1.074.3

Ключевые слова: адронный калориметр, сцинтилляторы, ОИЯИ, CMS, ЦЕРН.

ВВЕДЕНИЕ

Пластические сцинтилляторы (ПС) широко используются в экспериментах по физике частиц. Детекторы на основе сцинтиллятора применяются в калориметрии, в триггерах, координатных, времяпролетных и VETO-системах [1]. Во время эксплуатации сцинтилляторов в условиях интенсивных радиационных полей очень важной характеристикой становится их радиационная стойкость. Определение радиационной стойкости материалов детекторов является важнейшей задачей, стоящей перед исследователями. Известно, что ПС в течение некоторого времени теряют свои оптические свойства из-за радиационных повреждений. Это приводит к частичной или полной потере информации о регистрируемых частицах.

Целью данной работы является исследование радиационной стойкости современных ПС, рассматриваемых для модернизации торцевого адронного калориметра эксперимента CMS [2]. Собранные данные коллаборацией CMS на Большом адронном коллайдере (БАК) [3] показали, что световой выход адронного калориметра CMS уменьшается из-за радиационных повреждений гораздо быстрее, чем предполагалось. В частности считается, что адронный калориметр не сможет доработать до конца своего первоначально запланированного срока службы без замены большей его части. В действующем калориметре используется пластический сцинтиллятор Kuraray SCSN-81, производство которого в настоящее время остановлено.

1. ПОДГОТОВКА ИССЛЕДУЕМЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ К ИЗМЕРЕНИЯМ

Пластические сцинтилляторы — это твердые растворы некоторых органических сцинтилляторов в полистироле PS (C₈H₈)_n или поливинилтолуоле PVT (C₉H₁₀)_n, обладающие хорошими оптическими свойствами: относительно высоким световыходом и коротким временем высвечивания 2-4 нс. Самое несомненное достоинство ПС в том, что такие сцинтилляторы можно изготовить практически любой формы в отличие от неорганических сцинтилляторов.

Для исследования радиационной стойкости ПС, Харьковским Институтом сцинтилляционных материалов (ИСМА) [4] были подготовлены сцинтилляторы SCSN-81 и UPS-923A на основе полистирола и сцинтилляторы BC-408 и EJ-260 на основе поливинилтолуола. Также Институтом физики высоких энергий (ИФВЭ) г. Протвино [5] были подготовлены сцинтилляторы SC-301 и SC-307 на основе полистирола. Основные характеристики данных сцинтилляторов перечислены в табл. I.

Подготовленные образцы представляли собой отдельные ПС — ячейки размером 30 × 30 × 3 мм³. Каждый отдельный образец сцинтиллятора имеет лунку в центре. Лунка является посадочным местом для фотоприемника и линзой, собирающей свет непосредственно на фотоприемник.

Качество сцинтилляционного детектора определяется не только световыходом сцинтиллятора, но и эффективностью системы светосбора и индивидуальными характеристиками фотоприемника. Светосбор, в свою очередь, зависит не только от прозрачности сцинтиллятора, но и от качества его поверхности (в том числе и лунки) и использования отражающих материалов.

Исходя из этих условий, для улучшения светосбора часть исследуемых образцов перед облучением была завернута в отражатель Tyvek [6] на основе высокоплотного нетканого полимера, другая часть — в зеркальный отражатель ESR [7]. ESR — это мно-

^{*}E-mail: ustinov@jinr.ru

[†]E-mail: suhov@jinr.ru

[‡]E-mail: afanasev@ihe.jinr.ru

[§]E-mail: sakulin@jinr.ru

Таблица I: Основные характеристики исследуемых сцинтилляторов

	BC-408	EJ-260	SCSN-81	UPS-923A	SC-301	SC-307
Световыход относительно антрацена, %	64	60	50	60	55	69
Максимум спектра излучения, нм	425	490	440	425	420	416
Время высвечивания, нс	2.1	9.2	2.5	3.3	2.4	2.2
Основной материал	PVT	PVT	PS	PS	PS	PS

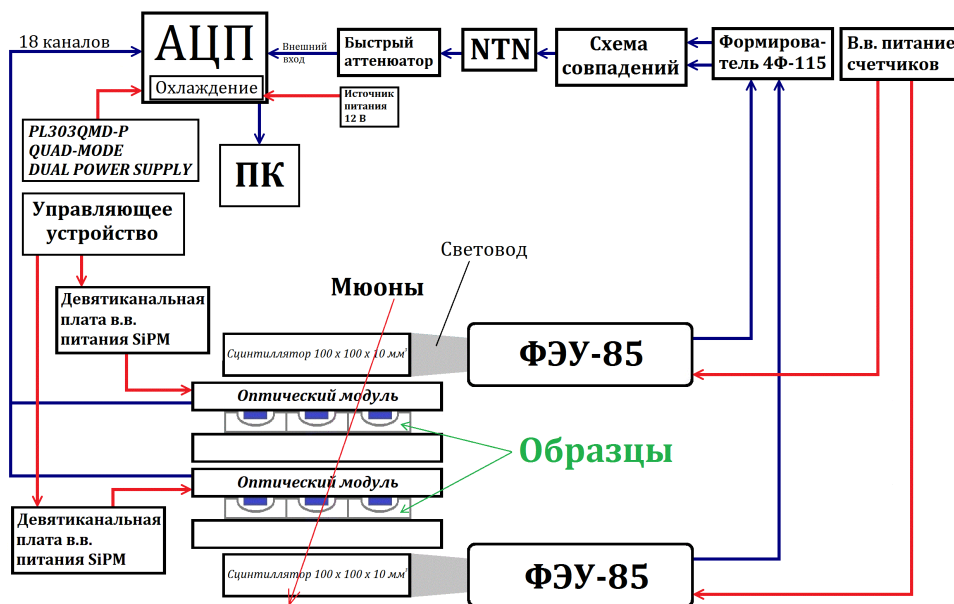


Рис. 1: Экспериментальный стенд на основе кремниевых фотоумножителей

гослойные полимерные неметаллические пленки, которые имеют эффективность зеркального отражения более чем 98.5%.

Некоторые образцы имели следующие внешние отражающие покрытия:

1. Покрытие на водной основе с добавлением диоксида титана (Paint+TiO₂). Светоотражающая добавка TiO₂ обладает не только прекрасной отражающей способностью, но и обеспечивает хорошую адгезию с основой, защиту внутренних слоев от механических и химических повреждений.
2. Полимерное покрытие на основе полиметилсилоксана с добавлением диоксида титана (PMS+TiO₂). PMS — это синтетическое вещество на основе силиконовых смол.
3. Эпоксидное покрытие (смола) с добавлением диоксида титана (Ероху+TiO₂).

Для измерения большого количества сцинтилляторов в короткий срок при низких интенсивностях потока частиц требуется проводить одновременно несколько измерений. Исходя из этого, был создан многоканальный универсальный стенд [8] на базе ЛФВЭ ОИ-

ЯИ [9]. Единственным постоянным источником релятивистских частиц для стенда является космическое излучение

Блок-схема измерительного стенда представлена на рис. 1. Основой стенда являются десятиканальные оптические модули, представляющие собой печатные платы с установленными кремниевыми фотоприемниками. В качестве фотоприемников используются кремниевые фотоумножители S12572-015P [10] размером 3x3 мм². Такой стенд позволяет использовать до 7 оптических модулей и измерять до 63 сцинтилляторов одновременно. Сигналы с оптических модулей поступают прямо на 64-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), оцифровываются и записываются системой сбора данных на персональном компьютере. Чтобы получить значение выходного сигнала в абсолютных единицах — фотоэлектронах (ф.э.), необходимо сделать перевод значений амплитуды сигнала из относительных единиц, выраженных в каналах АЦП. Для этого все каналы оптических модулей были откалиброваны под единый уровень светового потока с помощью референсного сцинтиллятора.

Результаты предварительных измерений необлученных сцинтилляторов представлены в табл. II.

Таблица II: Абсолютные значения световыхода измеренных ПС перед облучением

Сцинтиллятор	Отражатель	Кол-во измеренных образцов	Среднее значение световыхода, ф.э.	Относительный световыход
BC-408	ESR	10	21.86 ± 0.9	1.0
EJ-260	ESR	10	25.33 ± 1.1	1.16
UPS-923A	ESR	20	19.94 ± 0.7	0.91
SC-301	ESR	10	26.71 ± 1.0	1.22
SC-307	ESR	10	24.44 ± 0.7	1.12
BC-408	Tyvek	10	11.2 ± 0.3	0.51
EJ-260	Tyvek	10	10.2 ± 0.2	0.47
UPS-923A	Tyvek	10	11.6 ± 0.5	0.53
SCSN-81	Tyvek	10	11.96 ± 0.3	0.55
UPS-923A	Epoxy + TiO ₂	10	5.88 ± 0.15	0.27
UPS-923A	PMS + TiO ₂	8	11.2 ± 0.3	0.51
UPS-923A	Paint + TiO ₂	5	10.1 ± 0.2	0.46

2. ОБЛУЧЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА CMS И ИБР-2

Исследуемые сцинтилляторы облучались в двух экспериментах:

1. Внутри спектрометра CMS на вторичном протонном пучке БАК в ЦЕРН;
2. В нейтронном исследовательском реакторе ИБР-2 в ОИЯИ, г. Дубна [11]. Нейтронный реактор ИБР-2 со своими уникальными техническими решениями имеет один из самых высоких потоков нейтронов у замедлителя в мире.

В эксперименте на CMS перед размещением образцов была собрана башня из десяти уровней. На каждом уровне располагались по девять сцинтилляторов, кроме двух последних уровней. Все образцы заворачивались в конверты из отражателя Tyvek. Расстояние от уровня до циркулирующего протонного пучка БАК определяло величину поглощенной радиационной дозы. Таким образом, можно исследовать образцы в зависимости от дозы облучения. Образцы на CMS облучались в течение пяти месяцев с июня по ноябрь 2018 г.

В эксперименте в реакторе ИБР-2 сцинтилляторы делились на шесть сцинтилляционных блоков, образованных из одинакового числа образцов различных типов, и размещались в трубе пользовательского канала на разных расстояниях от активной зоны реактора. Все сцинтилляторы перед облучением в реакторе ИБР-2 были обернуты в зеркальный отражатель ESR и облучались в течение двенадцатидневного цикла работы реактора в марте 2019 г.

Поглощенная доза в каждом образце была получена из показаний индивидуальных дозиметрических пленок FWT-60-00 Radiochromic Films [12]. Для этого

на каждом образце располагалось по два индивидуальных дозиметра. Дозиметры FWT-60 — это тонкие бесцветные пленки, которые меняют цвет от проникающего излучения. При воздействии ультрафиолетового или ионизирующего излучения дозиметр меняется от бесцветного до темно-синего окрашенного состояния. Интенсивность этой окраски пропорциональна полученной дозе облучения. Диапазон измеряемых доз составляет 0.05–20 МРад.

Показания с дозиметров получены с помощью фотометра Far West Technology Radiochromic Reader. Погрешность измерения поглощенной дозы каждым индивидуальным дозиметром не превышает 10%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЛУЧЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Степень радиационных повреждений сцинтилляторов определялась по отношению выходного сигнала облученных образцов относительно начальных значений до облучения. Для этого все сцинтилляторы перед облучением были измерены на стенде рис. 1, и также измерены после облучения. Изменение выходного сигнала, выраженное в относительных единицах, показывает степень потерь света облученного сцинтиллятора.

Облучение сцинтилляторов в эксперименте на CMS показывает, что образцы с одинаковой длиной волны излучения имеют сходные характеристики уменьшения выходного сигнала. Так для сцинтилляторов SCSN-81 и UPS-923A на основе полистирола, и сцинтилляторов BC-408 на основе поливинилтолуола, завернутых в двухслойные конверты из отражателя Tyvek, теряется до половины выходного сигнала при поглощенной дозе в 1.2–1.4 МРад (рис. 2, а, б, в). Сцинтиллятор SCSN-81 излучает в голубом диапазоне с максимумом на длине волны 440 нм, сцинтилляторы BC-408 и UPS-923A излучают с максимумом на длине волны 425 нм.

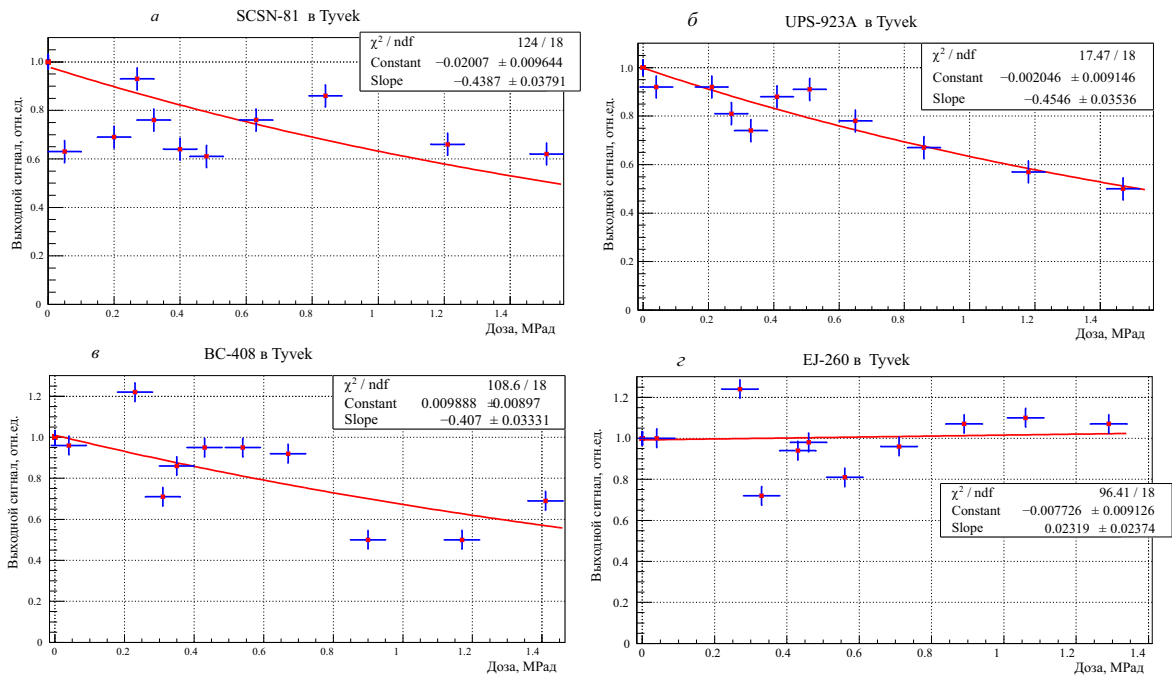


Рис. 2: Относительное изменение выходного сигнала в зависимости от поглощенной дозы для облученных сцинтилляторов SCSN-81 — а, UPS-923A — б, BC-408 — в и EJ-260 — г в отражателе Тувек

Для анализа полученных результатов использовалась программа обработки экспериментальных данных ROOT.

Наибольшей радиационной стойкостью обладают сцинтилляторы EJ-260 с длинноволновым излучением (490 нм). Для сцинтилляторов EJ-260, обернутых в отражатель Тувек, не наблюдается изменений выходного сигнала в пределах ошибок эксперимента (рис. 2, г). Зеленая флуоресценция имеет достаточно короткую длину волны, и эффективность сцинтилляции достаточно высока для успешного использования с обычными голубыми чувствительными фотоумножителями.

Сравнение использования двух отражателей Тувек (эксперимент на CMS) и ESR (эксперимент на ИБР-2) показало практически одинаковый результат для сцинтилляторов с длиной волны излучения 416–440 нм. Так для сцинтилляторов UPS-923A, BC-408, SC-301 и SC-307 наблюдается схожее поведение уменьшения выходного сигнала при облучении в реакторе ИБР-2 (рис. 3, б, в, г, д). При значениях поглощенной дозы 0.8–0.9 Мрад, световой выход сцинтилляторов в реакторе ИБР-2 деградирует на ~ 50%, в то время как в эксперименте на CMS выходной сигнал уменьшается на ~ 30% при соответствующей поглощенной дозе. Весьма вероятно, что такое поведение связано с различными условиями облучения сцинтилляторов. Средняя мощность дозы в эксперименте на ИБР-2 составила 2 кРад/час, в то время как в эксперименте на CMS средняя мощность дозы составила около 0.9 кРад/час. Более того, область вокруг реактора ИБР-2, в которой облучались сцинтилляторы, имеет более агрес-

сивную среду нежели зона облучения сцинтилляторов на CMS.

Для образцов EJ-260 с максимумом излучения 490 нм, также облученных в реакторе ИБР-2, наблюдается незначительное ухудшение выходного сигнала с увеличением поглощенной дозы (рис. 3, а).

Исходя из результатов экспериментов на CMS и ИБР-2 можно утверждать, что потеря световых «синих» сцинтилляторов при облучении связана не с материалом основы (полистирол или поливинилтолуол), а с длиной волны излучения. Для сцинтилляторов с максимумом излучения ~ 420 нм наблюдается схожее уменьшение выходного сигнала в зависимости от поглощенной дозы.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ТУВЕК И ESR В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

В эксперименте на CMS все сцинтилляторы имели лунку для фотоприемника и отражающее покрытие, свет от мюонов при измерениях выходного сигнала до и после облучения собирался на фотоприемник в результате многократных отражений от отражающего покрытия (рис. 4, а). Сравним результаты эксперимента на CMS с результатами облучения сцинтилляторов на установке ИРЕН (Источник резонансных нейтронов), г. Дубна [13]. Следует обратить внимание, что эксперименты имеют различные условия.

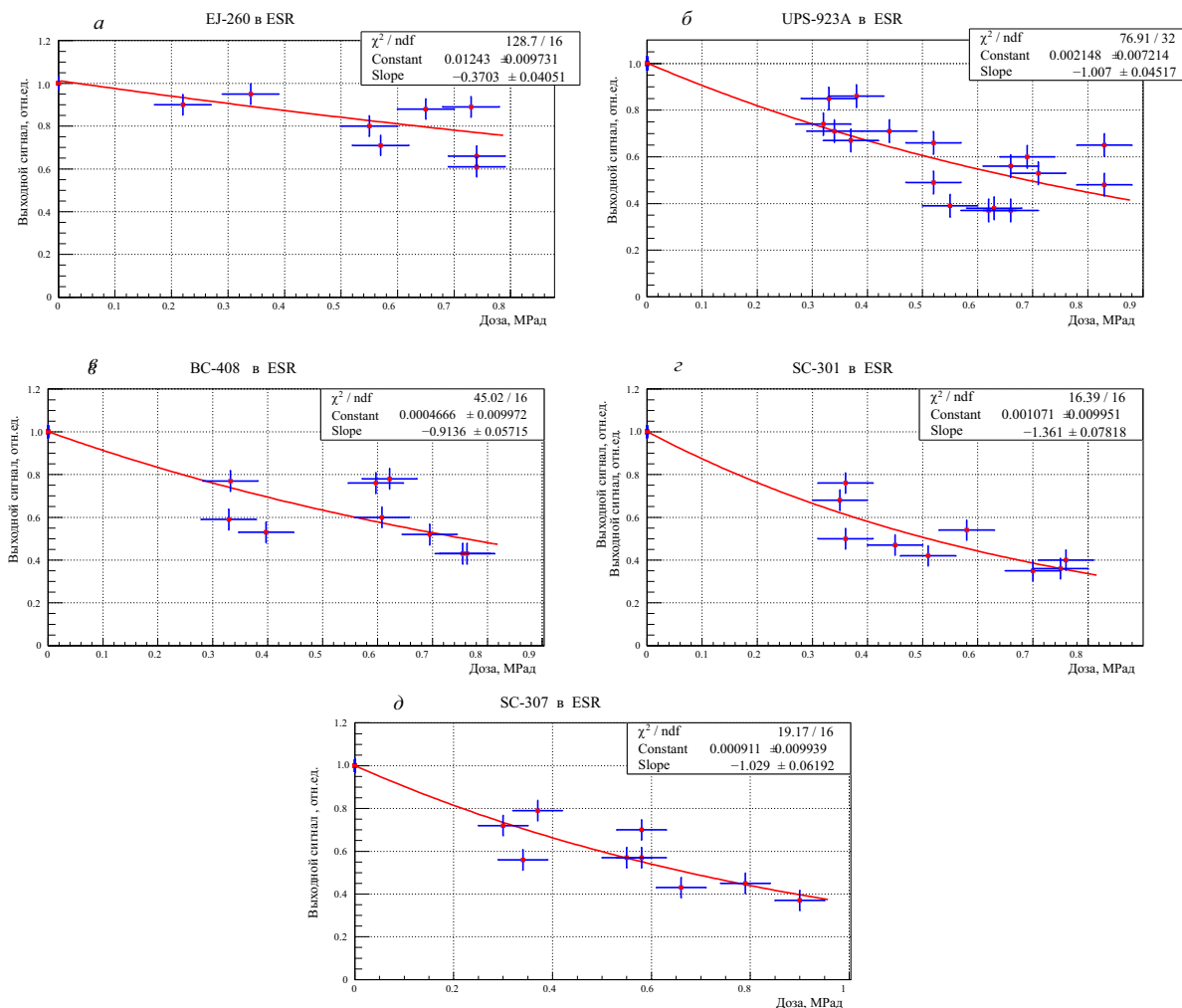


Рис. 3: Относительное изменение выходного сигнала в зависимости от поглощенной дозы для облученных сцинтилляторов EJ-260 —а, UPS-923A —б, BC-408 —в, SC-301 —г, и SC-307 —д в отражателе ESR

В эксперименте на установке ИРЕН образцы представляли собой «голый» сцинтиллятор без лунки и отражателя. Сцинтилляторы облучались нейтронами. Съем света со сцинтилляторов до и после облучения осуществлялся в прямом контакте фотоприемника с образцом (рис. 4,б). Источником излучения для измерения световых выходов являлся америций-241. Более подробное описание эксперимента на установке ИРЕН можно найти в статье CMS NOTE 2014/003 [14].

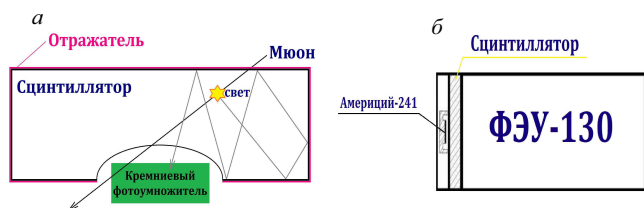


Рис. 4: Регистрация света в эксперименте на CMS — а и в эксперименте на установке ИРЕН — б

Из рис. 5 видно, что сцинтилляторы SCSN-81, BC-408 и UPS-923A, облученные без отражателя на установке ИРЕН, показывают уменьшение выходного сигнала не более чем 10% в диапазоне поглощенных доз 0–1.5 МРад. Образцы, облученные в отражателе Тувек в эксперименте на CMS, теряют до половины выходного сигнала при соответствующей дозе облучения (рис. 2,а, б, в).

Проведено исследование отражающей способности Тувек и PMS+TiO₂. Отражатели Тувек и PMS+TiO₂ были также облучены в эксперименте на CMS. Для анализа полученных данных, были использованы результаты измерения отражающей способности Тувек и PMS+TiO₂, выполненные в ИСМА. Результаты показывают, что Тувек и полиметилсилоксан имеют коэффициент отражения более 95% в области 420 нм и выше вне зависимости от поглощенной дозы. Ниже 420 нм Тувек теряет свои отражающие свойства с увеличением поглощенной дозы. Для полиметилсилоксана с добавкой диоксида титана никаких изменений прак-

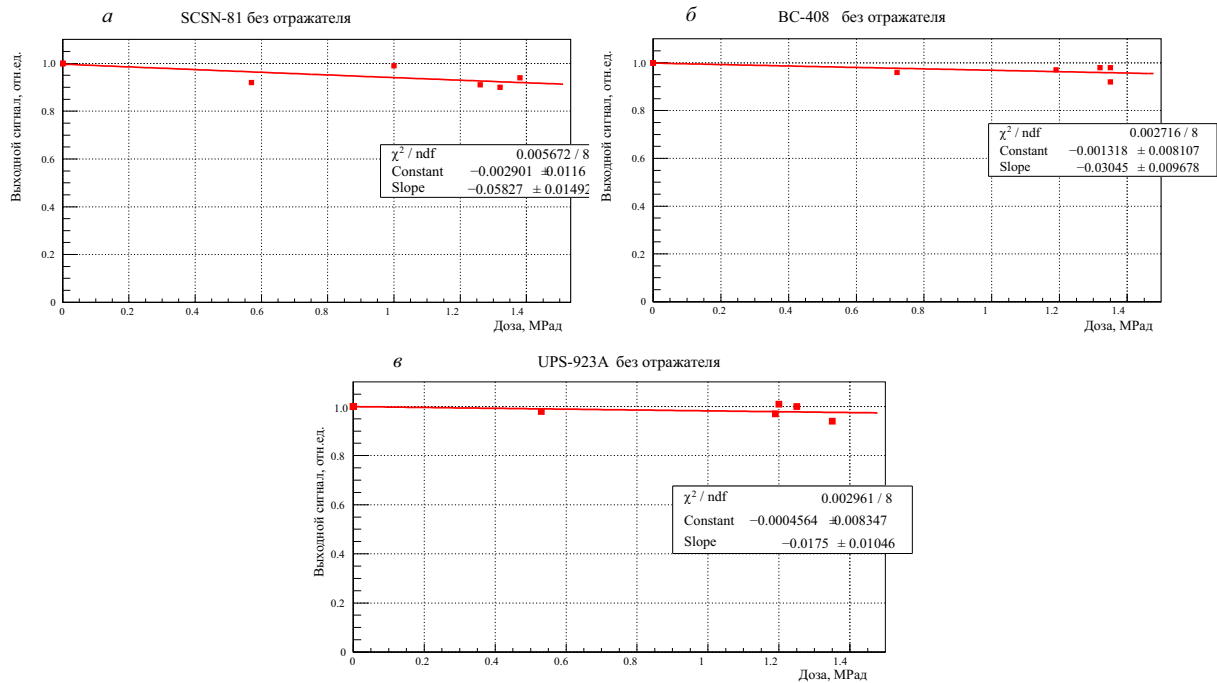


Рис. 5: Относительное изменение выходного сигнала в зависимости от поглощенной дозы для облученных сцинтилляторов SCSN-81 — а, BC-408 — б и UPS-923A — в без отражателя

тически не наблюдается, что указывает на более высокую радиационную стойкость этого отражателя.

Исходя из того, что отражатель Тувек теряет свои отражающие свойства в ультрафиолетовой области с увеличением поглощенной дозы, была рассчитана величина уменьшения выходного сигнала при однократном отражении от облученного отражателя Тувек. Расчет проводился по спектру отражения облученного Тувек, эффективности регистрации фотонов SiPM и спектру излучения сцинтилляторов BC-408, UPS-923A, SCSN-81 и EJ-260.

Результаты расчетов представлены на рис. 6. Три типа сцинтилляторов с одинаковой длиной волны излучения имеют одинаковые потери света в конвертах из отражателя Тувек. Облученный Тувек теряет свои отражающие свойства до 5% на одно отражение при дозе в 1.5 МРад. Многократное отражение света приводит к значительным потерям. При десятикратном отражении выходной сигнал уменьшается вдвое. Потери света, полученные в результате эксперимента на CMS можно объяснить ухудшением отражающей способности Тувек при облучении.

Для данной проверки радиационной стойкости отражателя ESR использовался сравнительный метод анализа. Метод исследования заключался в измерении световых выходов одного и того же сцинтиллятора, который оборачивался в облученные и не облученные образцы отражателя ESR. Проверка отражателя ESR не показала изменений в выходном сигнале референсного сцинтиллятора при значении поглощенной отражателем ESR дозы 0.9 МРад относительно не облученного

отражателя. Этот результат действителен как для облученных, так и для не облученных сцинтилляторов.

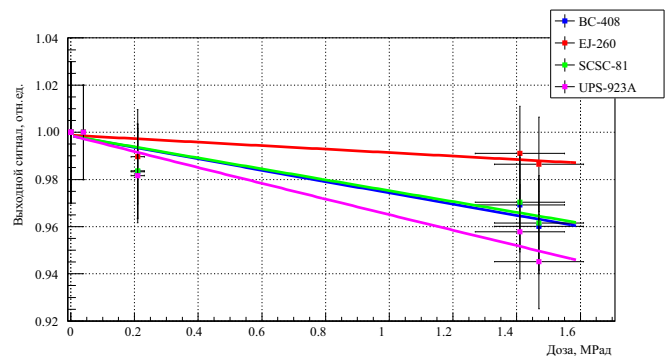


Рис. 6: Результаты расчетов потерь света на одно отражение в зависимости от дозы облучения для сцинтилляторов, обернутых в отражатель Тувек

5. СВЕТОСБОР ПЛАСТИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВНЕШНЕГО ОТРАЖАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ (PAINT+TiO₂, PMS+TiO₂ и EPOXY+TiO₂)

Исследовано влияние трех типов внешних покрытий на регистрируемый сигнал с облученных сцинтилляторов. Для образцов UPS-923A, использующие покрытие на основе водоземulsionной краски с добавкой диоксида титана (Paint+TiO₂), и для сцинтилляторов UPS-

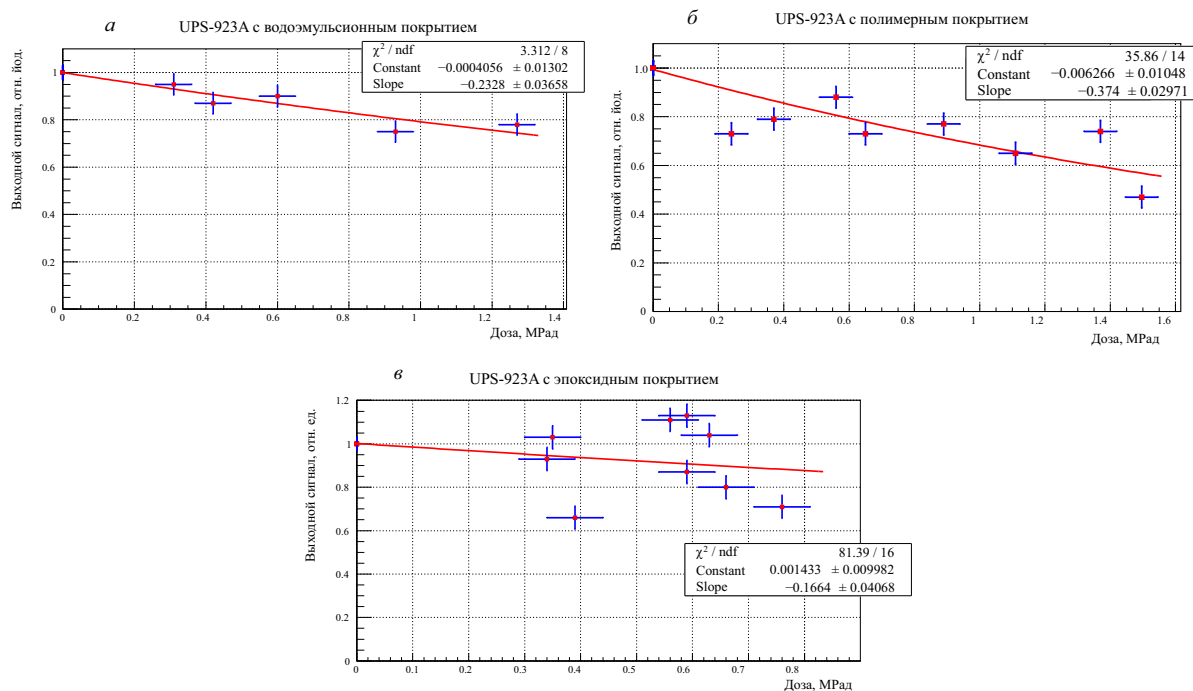


Рис. 7: Относительное изменение выходного сигнала в зависимости от поглощенной дозы для облученных сцинтилляторов UPS-923A с водоэмульсионным покрытием Paint+TiO₂ — а, с полимерным покрытием PMS+TiO₂ — б и с эпоксидным покрытием Epoxy+TiO₂ — в

923A, покрытых более толстым и плотным отражателем на основе полиметилсилоксана (PMS+TiO₂), наблюдается уменьшение выходного сигнала более чем 30% при дозе в 1.4 МРад (рис. 7, а, б).

Для сцинтилляторов UPS-923A, использующих эпоксидное покрытие с добавкой диоксида титана (Epoxy+TiO₂), имеется незначительное изменение выходного сигнала (рис. 7, в). В пределах ошибок эксперимента и выполненной аппроксимации, можно утверждать, что изменение выходного сигнала составляет не более чем 10% для облученных сцинтилляторов с этим покрытием.

Результаты измерений для сцинтилляторов UPS-923A с эпоксидным покрытием не являются окончательными. Необходимо провести дополнительные измерения для получения более детальной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений облученных сцинтилляторов разных типов (с использованием отражателей) показывают, что сцинтилляторы с максимальной длиной волны излучения 416–440 нм имеют схожее поведение уменьшения выходного сигнала в сочетании с отражателем Tyvek или ESR в диапазоне доз 0–1.5 МРад. Облученный Tyvek теряет свои отражающие свойства в ультрафиолетовой области с ростом поглощенной

дозы, что приводит к значительным потерям света сцинтилляторами при высоких радиационных нагрузках в системе сцинтиллятор-отражатель.

Отражающие свойства не облученного отражателя ESR не отличаются от облученного ESR до дозы облучения 0.9 МРад

Наиболее радиационно-стойким сцинтиллятором является EJ-260 с максимумом излучения 490 нм. Для облученных сцинтилляторов EJ-260 нет изменений относительного выходного сигнала в отражателе Tyvek в диапазоне поглощенных доз 0–1.5 МРад, и малые изменения выходного сигнала в отражателе ESR в диапазоне доз 0–0.7 МРад.

Внешние покрытия Paint+TiO₂ и PMS+TiO₂ показывают одинаковые свойства при облучении. При поглощенной дозе в 1.4 МРад выходной сигнал сцинтилляторов UPS-923A, использующих данные покрытия, уменьшается более чем на 30%. Сцинтилляторы UPS-923A с нанесенным покрытием на основе эпоксидной смолы (Epoxy+TiO₂) показали незначительное снижение выходного сигнала в зависимости от величины поглощенной дозы.

Автор выражает благодарность Бояринцеву Андрею Юрьевичу (ИСМА) за предоставленную информацию об измерениях отражающей способности облученных образцов отражателей Tyvek и PMS+TiO₂.

- [1] Харжеев Ю. Н., «Сцинтилляционные счетчики в современных экспериментах по физике высоких энергий». ЭЧАЯ, Изд-во ОИЯИ, 2015.
- [2] Эксперимент CMS: [Электронный ресурс] // Copyright ©2019 CERN. М., URL: <https://home.cern/science/experiments/cms>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [3] Коллайдер LHC: [Электронный ресурс] // Copyright ©2019 CERN. М., URL: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [4] Институт сцинтилляционных материалов: [Электронный ресурс] // Copyright ©Центр «Харьковские Технологии», 2005. М., URL: <http://www.isma.kharkov.ua/about.html>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [5] Институт физики высоких энергий (ИФВЭ): [Электронный ресурс] // ИФВЭ ©1996-2018. М., URL: <http://www.ihep.su/>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [6] Tyvek: [Электронный ресурс] // Copyright ©DuPont, 2019. М., URL: <http://www.dupont.ru/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/protective-fabrics/brands/tyvek.html>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [7] Enhanced Specular Reflector (ESR): [Электронный ресурс] // Copyright ©3M 2019. М., URL: https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/3M-Enhanced-Specular-Reflector-3M-ESR/?N=5002385+3293061534&rt=rud_ (Дата обращения 09.07.2019).
- [8] Устинов В. В., «Стенд для исследования пластических сцинтилляторов на радиационную стойкость» [Текст] // Физический факультет МГУ, XXVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2019». Секция «Физика» Сборник тезисов. М. Физический факультет МГУ, 2019. С. 114.
- [9] Лаборатория физики высоких энергий имени Векслера и Балдина, Объединённый Институт Ядерных Исследований: [Электронный ресурс] // ©2019 ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ. М., URL: <http://lhep.jinr.ru/glavnaya/>. (Дата обращения 07.09.2019).
- [10] Кремниевый фотоумножитель S12572-015P: [Электронный ресурс] // Hamamatsu Photonics K.K. М., URL: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/S12572-015P.html>. (Дата обращения 03.10.2019).
- [11] Импульсный ректор ИБР-2М: [Электронный ресурс] // 2018 — JINR. М., URL: <http://lnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2#>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [12] Радиохромные дозиметры серии FWT-60: [Электронный ресурс] // Far West Technology, Inc. ©2002. М., URL: <http://www.fwt.com/racm/fwt60ds.htm>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [13] Установка ИРЕН ОИЯИ: [Электронный ресурс] // ООО ИнтерГрафика. М., URL: <http://lnph.jinr.ru/ru/facilities/iren>. (Дата обращения 09.07.2019).
- [14] Afanasev S. V. et al. // «Experimental study of the plastic scintillator damage caused by radiation on IREN at JINR». CMS NOTE. М. The Compact Muon Solenoid Experiment. 2014.

The results of the study of the radiation resistance of organic scintillators based on polystyrene and polyvinyltoluene

V. V. Ustinov^a, E. V. Sukhov^b, S. V. Afanasev^c, D. G. Sakulin^d

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia

E-mail: ^austinov@jinr.ru, ^bsuhov@jinr.ru, ^cafanasev@lhe.jinr.ru, ^dsakulin@jinr.ru

There were studies the radiation resistance of organic plastic scintillators UPS-923A, SCSN-81, SC-301 and SC-307 based on polystyrene, and scintillators BC-408 and EJ-260 based on polyvinyl toluene. There were also studied properties of irradiated Tyvek and ESR reflectors; Paint + TiO₂, PMS + TiO₂ and Epoxy + TiO₂ coatings. The results of this work are aimed at the creating of a radiation-resistant CMS Hadron Endcap Calorimeter at the Large Hadron Collider. The CMS detector is currently being upgraded to study the Higgs boson under the high luminosity conditions.

PACS: 29.40.Mc

Keywords: Hadron calorimeter, scintillators, JINR, CMS, CERN.

Received 19 June 2019.

Сведения об авторах

1. Устинов Валентин Валерьевич — аспирант, инженер; тел.: (495) 216-28-04, e-mail: ustinov@jinr.ru.
2. Сухов Евгений Викторович — магистр, инженер; тел.: (495) 216-28-04, e-mail: suhov@jinr.ru.
3. Афанасьев Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, нач. сектора, доцент; тел.: (495) 216-28-04, e-mail: afanasev@lhe.jinr.ru.
4. Сакулин Дмитрий Геннадьевич — аспирант, инженер; тел.: (495) 216-28-04, e-mail: sakulin@jinr.ru.