

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.039-78

### РАДИАЦИОННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ МОНИТОР

© 2021 г. В. Н. Алферов<sup>а,\*</sup>, Г. И. Бритвич<sup>а</sup>, Д. А. Васильев<sup>а</sup>, М. Ю. Костин<sup>а</sup>,  
А. В. Лутчев<sup>а</sup>, А. В. Сухих<sup>а</sup>, В. Н. Федорченко<sup>а</sup>, С. К. Черниченко<sup>а</sup>, А. А. Янович<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики высоких энергий им. А.А. Логонова Национального исследовательского центра

“Курчатовский институт”

Россия, 142282, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

\*e-mail: Vladimir.Alferov@ihep.ru

Поступила в редакцию 29.10.2020 г.

После доработки 21.01.2021 г.

Принята к публикации 23.01.2021 г.

Описан радиационный монитор на основе литьевого полистирольного сцинтиллятора со спектрсмещающими оптоволоконными, обладающий большой светосилой – размеры активной части детектора  $100 \times 200 \times 5$  см. В состав монитора входят также датчик присутствия объекта контроля и телевизионная камера, объединенные единой системой управления. Монитор предназначен для контроля транспортировки радиоактивных материалов. Описан опыт эксплуатации.

DOI: 10.31857/S0032816221030265

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

При работе с ядерными материалами и радиоактивными веществами крайне важны контроль и обеспечение безопасности перевозок. Одним из инструментов такого контроля являются радиационные мониторы, способные контролировать перевозку (перемещение) ядерных материалов и радиоактивных веществ автомобильным и железнодорожным транспортом без существенного ограничения скорости движения.

В настоящей работе описан радиационный монитор, чувствительный к низким потокам  $\gamma$ -квантов, с большой площадью и чувствительным объемом детектора, технологичный в производстве.

#### 2. КОНСТРУКЦИЯ (КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ)

Чувствительный объем монитора состоит из пластин литьевого полистирольного сцинтиллятора (п.с.), изготовленного по оригинальной технологии, разработанной в ИФВЭ [1]. Особенностью п.с. является то, что спектрсмещающие оптоволоконные пропускаются через канавки, выполненные в п.с., что обеспечивает эффективный однородный светосбор со всего чувствительного объема.

Полистирольный сцинтиллятор изготавливают методом литья под давлением из расплава полистирола марки BASF-143E со сцинтилляционными добавками (2% РТР, 0.02% РОРОР). Геометрические размеры каждой пластины п.с. составляют  $120 \times 100 \times 5$  мм, масса – 58.4 г. В пла-

стине выполнено 12 канавок (по 6 канавок с каждой стороны) длиной 100 мм, шириной 1.1 мм и глубиной 2.5 мм. Чувствительный объем набран из десяти слоев пластин п.с., толщина слоя равна 5 мм. Каждый слой содержит 160 пластин п.с. размером  $120 \times 100 \times 5$  мм и 20 пластин размером  $40 \times 100 \times 5$  мм, которые вырезаются из стандартной пластины п.с. размером  $120 \times 100 \times 5$  мм. Размеры чувствительного объема составляют  $2000 \times 1000 \times 50$  мм, его общая масса ~97 кг.

Технология литья под давлением обеспечивает высокое качество поверхности п.с., так что дополнительная механическая обработка (полировка, прорезание канавок) не требуется. Пластины изготавливают на литьевых машинах (термопластавтоматах) следующим образом. Предварительно подготовленную сухую смесь гранулированного полистирола и сцинтилляционных добавок загружают в литьевую машину, нагревают до 180–200°C, после чего смесь поступает в пресс-форму, в которой создается давление до 80 МПа. Один рабочий цикл машины составляет около 2 мин. Отклонение размеров изготовленных п.с. от заданных не превышает  $\pm 50$  мкм.

В качестве светособирающего элемента применяется спектрсмещающее оптоволоконно ВCF-91А МС фирмы Saint Gobain диаметром 1 мм (далее – оптоволоконно). Стоимость оптоволоконно составляет примерно 60% от общей стоимости сборки “сцинтиллятор + волоконно + фотоэлектронный умножитель (ф.э.у.)”. Оптоволоконно позволяет собирать свет с большого чувствительного объема. Изготовление такого объема (100 л) обычным ме-

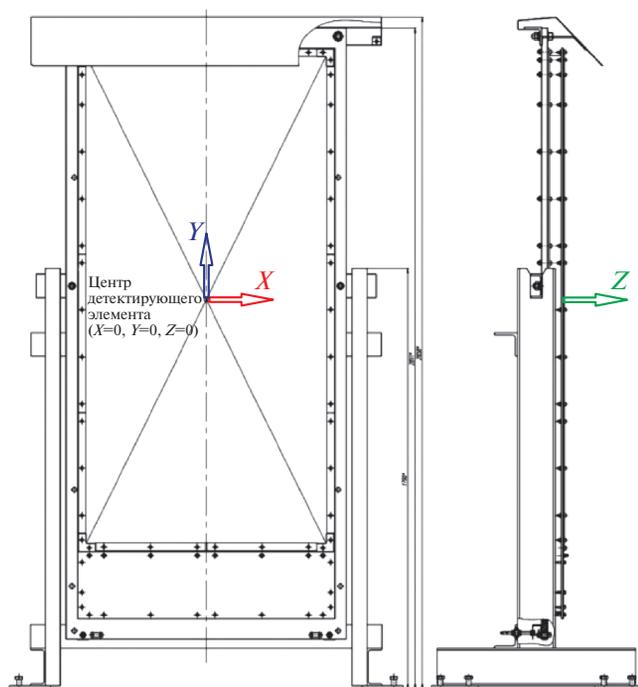


Рис. 1. Общий вид монитора.

тодом блочной полимеризации представляет собой сложную задачу. В литературе нами пока не найдено таких примеров. Чувствительность мониторов пропорциональна величине чувствительного объема.

Блок сцинтиллятора полимеризуется в течение нескольких дней в специальной ванне из стирола. Последний относится к третьему классу опасности по токсичности (ГОСТ 10003-90), а также является пожароопасным веществом. Перед полимеризацией стирол проходит дополнительную очистку с помощью окиси алюминия. После полимеризации блок механически обрабатывается (фрезеруется до нужного размера и полируется). Стоимость блочного сцинтиллятора примерно в 5 раз выше, чем изготовленного методом литья под давлением из промышленного гранулята на термопластавтоматах, а также превышает стоимость сборки «сцинтиллятор + волокно». Технологичность, высокая производительность, безопасность метода литья сцинтиллятора под давлением делает такой метод незаменимым при массовом производстве сцинтиллятора.

Использование спектросмещающего оптоволокна с длиной затухания более 3 м позволяет с однородностью до 15% собирать свет с чувствительного объема данного монитора и передавать его на фотоприемники с небольшим фотокатодом (два двухдюймовых ФЭУ 9954 KB фирмы ET Enterprises). Сигналы от ф.э.у. включены в схему совпадений, чтобы исключить шумы от ф.э.у. и



Рис. 2. Фотография монитора, установленного на автомобильном въезде в ИФВЭ.

электроники и соответственно повысить чувствительность монитора.

Порог обнаружения составляет 3 г стандартного образца из урана по ГОСТ 51635-2000 при ширине проезда транспортного средства перед монитором 3 м и высоте контролируемого пространства 3.5 м. Для тестов, как рекомендовано в стандарте, применялся альтернативный образец —  $^{137}\text{Cs}$  с активностью 600 кБк. Скорость перемещения стандартного образца составляет до 10 км/ч для автомобильного транспорта. Время срабатывания монитора (время от начала повышения скорости счета до достижения ее порогового значения) составляет несколько миллисекунд и зависит от активности источника в транспортном средстве и скорости движения последнего.

Общий вид монитора показан на рис. 1, фотография монитора приведена на рис. 2.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СБОРКИ “СЦИНТИЛЛЯТОР + ВОЛОКНО + Ф.Э.У.”

Состав сцинтиллятора определялся по оптимальному сочетанию таких параметров, как световой выход сцинтиллятора, положение пика поглощения и излучения света (определяется первич-

ной и вторичной добавками) и длина затухания света в сцинтиляторе [1].

Спектрсмещающее оптоволокно подбиралось исходя из наибольшей эффективности захвата переизлученного света, составляющей 5.6%. Было выбрано оптоволокно с двумя оболочками и с наименьшей разностью между положениями пиков излучения сцинтилятора и поглощения света оптоволоконном.

Спектр излучения сцинтилятора определяется вторичной добавкой РОРОР, максимум этого спектра находится на длине волны 420 нм и практически совпадает с максимумом спектра поглощения оптоволоконка. На рис. 3 приведена эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов в диапазоне энергий от 10 кэВ до 10 МэВ для сборки “сцинтилятор + волокно + ф.э.у.” данного монитора (при толщине чувствительного объема 50 мм и значении квантового выхода  $\omega = 55 \pm 1$  ф.э./МэВ). Процедура определения квантового выхода  $\omega$  подробно описана в [1]. Расчет характеристик прототипа радиационного монитора для контроля перемещений радиоактивных материалов движущимися транспортными средствами приведен в работе [2].

#### 4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления включает в себя следующие узлы.

1. Электроника питания – умножитель напряжения Кокрофта–Уолтона с низковольтным питанием  $\pm 15$  В, стабильность на уровне  $10^{-3}$ .

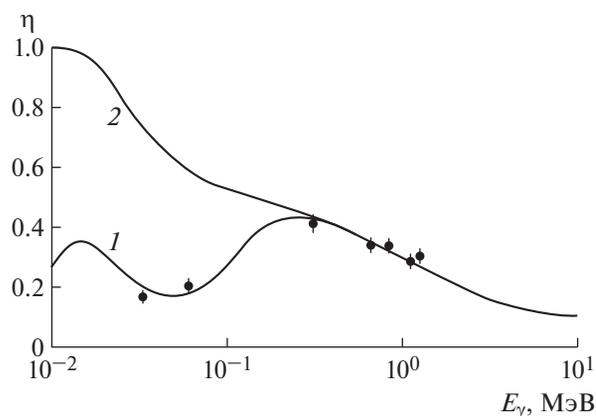
2. Усилитель-формирователь, электроника триггера. Сигналы от фотоприемников включены в схему совпадений для минимизации аппаратного фона, частота этих совпадений отражает плотность потока  $\gamma$ -излучения. Сцинтилляционный свет возникает при прохождении через сцинтилляционные пластины ионизирующего излучения от радиоактивных объектов. Компаратор отсекает шумы, а формирователь обеспечивает импульс ТТЛ-уровня, соответствующий каждой световой вспышке, т.е. каждому  $\gamma$ -кванту.

3. Управляемый источник питания.

4. Контроллер монитора. Его основные функции: измерение частоты сигналов с детектирующего устройства, контроль оборудования и температуры, генерация звукового сигнала.

5. Системная часть монитора содержит промышленный компьютер, датчик пересечения объектом границы зоны контроля и сетевую видеокамеру AXIS.

Компьютер выполняет следующие функции. Предварительно он оценивает уровень фона в течение определенного времени до прохождения объекта мимо каждого детектора. Фоновая частота составляет от единиц до десятков импуль-



**Рис. 3.** Эффективность регистрации  $\eta$   $\gamma$ -квантов в диапазоне энергий от 10 кэВ до 10 МэВ для монитора с толщиной чувствительного объема 5 см и значением квантового выхода  $\omega = 55 \pm 1$  ф.э./МэВ (1). Точки – экспериментальные значения с порогом регистрации 0.2 ф.э.; 2 – геометрическая эффективность при нормальном падении  $\gamma$ -кванта на сцинтилятор толщиной 5 см.

сов в секунду и нестабильна во времени. Время накопления фонового сигнала и уровень срабатывания регулируются.

После получения сигнала от датчика пересечения о входе объекта в контролируемую зону система в течение нескольких секунд измеряет новую частоту. При сохранении или понижении фонового излучения за счет экранировки объектом компьютер посылает оператору системы сигнал отсутствия источников излучения и пропускает объект.

При превышении пороговой частоты компьютер генерирует:

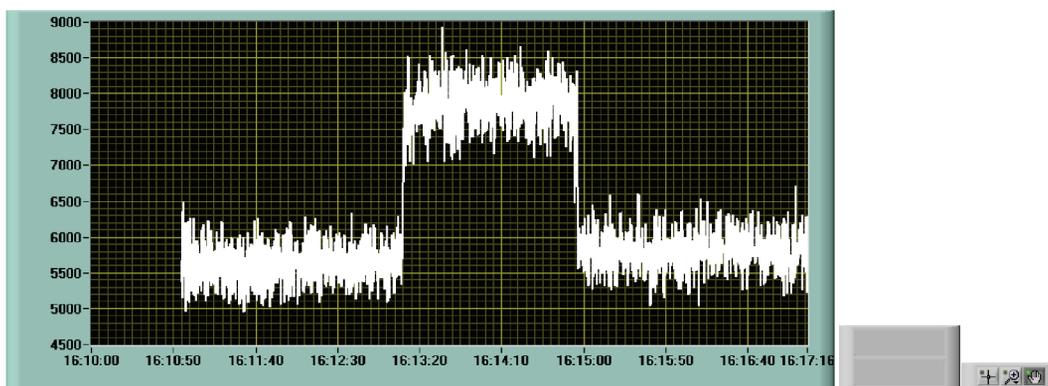
- оператору тревожный сигнал;
- в диспетчерской тревожный сигнал и запись соответствующего видеосигнала с видеокамеры до выхода объекта из контролируемой зоны.

Также компьютер ведет архив.

Программное обеспечение работает под операционной системой MS Windows (XP, 7, 8). Для работы с микропроцессорными модулями детекторов используются полевые магистрали RS-485. Частота опроса детекторов составляет 0.1 с.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для проведения настройки и контроля порога срабатывания мониторов использовались тестовые образцы на основе хлористого калия (KCl). Образцы представляли собой емкости объемом ~1 л, в которых находился химически чистый KCl в виде порошка. Плотность порошка 1.21 г/см<sup>3</sup>. Объемная активность KCl составляет  $1.8 \pm 0.2$  кБк/кг.



**Рис. 4.** Оциллограмма сигнала (отклик) монитора (в относительных единицах) при установке тестовых образцов на расстоянии 0.2 м от передней поверхности монитора.

Для настройки и контроля мониторов использовался комплект тестовых образцов, состоящий из 10 кг КС1 (около 18 кБк).

На рис. 4 приведена оциллограмма сигнала (отклик) монитора (в относительных единицах) при установке тестовых образцов на расстоянии 0.2 м от передней поверхности монитора. Можно отметить хорошее превышение сигналом фона, достаточное для калибровки монитора.

На рис. 5 приведена фотография автомобиля со слаборadioактивным грузом, проезжающего мимо монитора со скоростью около 50 км/ч (монитор в левом верхнем углу виден с торца), а на рис. 6 – сигнал отклика монитора (в относительных единицах).

Опытный транспортный монитор был изготовлен и установлен на транспортном въезде в ИФВЭ для тестирования. Он проработал три года без перерывов на открытом пространстве без отказов. Это дает основание утверждать, что он соответствует требованиям ГОСТ 51635-2000 по категории К6 (от  $-25$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , открытое пространство).

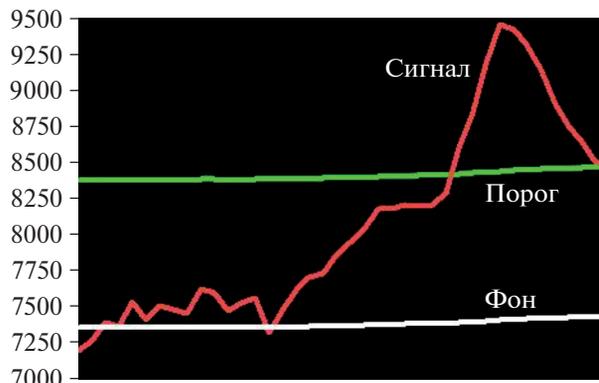


**Рис. 5.** Автомобиль с грузом с допустимой активностью проезжает мимо монитора (монитор в левом верхнем углу виден с торца).

Потребляемая мощность монитора составляет 50 Вт. Минимально обнаруживаемая активность зависит от скорости проходящего транспортного средства. Для регистрации радиоактивных материалов в транспортных средствах, движущихся со скоростями свыше 100 км/ч, требуется установка линейки мониторов из 5–6 штук в непосредственной близости друг от друга. Такая линейка будет работать как единый монитор с чувствительным объемом, кратным количеству мониторов в линейке. Существуют расчеты, показывающие эффективность работы такой схемы [3].

## 6. ВЫВОДЫ

Создан радиационный монитор, обладающий большой площадью и чувствительным объемом  $100 \times 200 \times 5 \text{ см}^3$  для регистрации ионизирующего излучения от радиоактивных источников, находящихся в транспортных средствах. Монитор характеризуется технологичностью изготовления и возможностью комплектования коммерчески доступными материалами от нескольких поставщи-



**Рис. 6.** Сигнал монитора при проезде радиоактивного груза со скоростью около 50 км/ч.

ков. Предложение использовать литевой сцинтиллятор для радиационных мониторов является инновационным. Характеристики монитора соответствуют требованиям ГОСТ 51635-2000 по категории IVγ для γ-мониторов на основе сцинтилляторов из пластмассы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4х.44.90.13.1118 от 31.05.2013 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бритвич Г.И., Бреховских В.В., Семенов В.К., Холоденко С.А.* // ПТЭ. 2015. № 2. С. 47.  
<https://doi.org/10.7868/S0032816215020159>
2. *Костин М.Ю., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Янович А.А.* Препринт ИФВЭ 2014-19. Протвино, 2014.
3. *Schroettner T., Kindl P., Presle G.* // Applied Radiation and Isotopes. 2009. V. 67. Issue 10. P. 1878.  
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.04.015>