



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2018–17

А.М. Горин, В.А. Дятченко, В.Д. Ковалев, М.В. Медынский,  
В.И. Рыкалин

**Тонкие счетчики большой площади  
для идентификации заряженных частиц**

Направлено в *NIMA*  
*Proceedings*

Протвино 2018

**Аннотация**

Горин А.М. и др. Тонкие счётчики большой площади для идентификации заряженных частиц: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2018–17. – Протвино, 2018. – 9 с., 7 рис., 3 табл., библиогр.: 5.

В данной работе представлены характеристики и возможные применения тонких сцинтилляционных счётчиков на основе фотоумножителей с протяженным фотокатодом (ФЭУ-КС) и тонких, толщиной не более 1 мм полистирольных сцинтилляторов. Фотоумножитель, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, представляет собой стеклянную колбу диаметром 40 мм, на внутренней поверхности которой сформован протяжённый бищелочной фотокатод с размерами  $15 \times 200 \text{ мм}^2$ , с диодной системой длиной 200 мм, расположенной под фотокатодом, одним или двумя протяжёнными анодами. Высота сцинтиллятора длиной до 200 мм, устанавливаемого на окно фотокатода, ограничивается длиной затухания света в сцинтилляторе, что в нашем случае при толщине в 1 мм составляет 300 мм. При этом характерный световыход счётчика составляет 110 ф.э./МэВ, что обеспечивает более чем 98% эффективность регистрации заряженных частиц с минимальной ионизацией. Показано, что счётчики такого типа обеспечивают высокое подавление скорости счета гамма-квантов. Для энергий менее 1,7 МэВ отношение режекции гамма/бета не хуже, чем  $3 \cdot 10^{-2}$ . Максимальная скорость счёта детектора при указанной выше эффективности регистрации составляет более  $10^7$  частиц/с.

Такие счётчики используются в экспериментах «ОКА» и «ГИПЕРОН» на протонном синхротроне У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ с целью существенного уменьшения рассеяния пучковых частиц с малой энергией. Проведенные с помощью радиоактивных источников измерения показали высокую эффективность использования тонких счётчиков для идентификации заряженных частиц низких энергий, например в системах контроля загрязнений источниками бета-излучения.

**Abstract**

Gorin A.M. et al. Large area thin scintillating counters as charge particles identification detector: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2018–17. – Protvino, 2018. – p. 9, figs. 7, tables 3, refs.: 5.

The paper presents parameters and possible applications of the detectors based on developed in NRC «Kurchatov Institute – IHEP» photomultipliers with a lengthy photocathode (FEU-KS) and polystyrene-based scintillators with 1 mm thickness and up to 200 mm width. Photomultiplier FEU-KS is a tubular glass envelope and it has be-alkaline photocathode, dynodes and one or two anodes. The length of the detector scintillators is limited by light attenuation length in scintillator and is about 300 mm in our case. The typical light output of the detector is about 110 ph.e./MeV that provides efficiency of MIP detection more than 98%. The detector of this type provides a high ratio of suppression of the gamma-quants counting rate. For the energy less than 1,7 MeV the ratio of  $\gamma/e$  rejection is not worth than  $3 \cdot 10^{-2}$ . The maximum counting-rate of the detector is around  $10^7$  pulses/s. The set of measurements for low energies was done also and it shows the efficiency of such type detectors for identification of charged low-energy particles, for example, in the monitoring systems of beta radiation pollution.

## Введение

Данная статья посвящена главным образом изучению возможности регистрации  $\beta$ -частиц с низкой энергией (электронов, позитронов) на фоне гамма-квантов ( $\gamma$ ) с использованием тонких сцинтилляционных счетчиков на основе фотоумножителя с протяженным фотокатодом типа ФЭУ-КС [1, 2]. Эти счетчики обеспечивают высокую эффективность регистрации  $\beta$ -частиц в области энергий выше нескольких десятков кэВ, и обеспечивают подавление счета от  $\gamma$ -излучения бета-нуклидов, что позволяет заменить ими инерционные и недостаточно эффективные газоразрядные детекторы. В работе описываются узлы экспериментальной модели детектора  $\beta$ -загрязнений на основе двух тонких счетчиков, основные характеристики счетчиков, в том числе энергетическая зависимость значения режекции  $\gamma / \beta$  в диапазоне энергий до 1,7 МэВ.

Разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ фотоумножитель ФЭУ-КС представляет собой стеклянную колбу диаметром 40 мм, на внутренней поверхности которой сформован бищелочный фотокатод с размерами 15 x 200 мм<sup>2</sup>, внутри колбы расположены 10-диодная умножительная система длиной 200 мм и один или два анода длиной 200 мм или 100 мм соответственно. Высота сцинтиллятора длиной до 200 мм, устанавливаемого на окно фотокатода, ограничивается длиной затухания света в сцинтилляторе, что в нашем случае при толщине в 1 мм составляет 300 мм. При этом характерный световой выход счётчика соответствует 110 ф.э./МэВ, что обеспечивает более чем 98% эффективности регистрации заряженных частиц с минимальной ионизацией.

Счётчики такого типа обеспечивают высокое подавление скорости счета гамма-квантов. Для энергий менее 1,7 МэВ отношение режекции гамма/бета не хуже, чем  $3 \cdot 10^{-2}$ . Максимальная скорость счёта детектора при указанной выше эффективности регистрации составляет более  $10^7$  частиц/с.

Подобные счётчики используются в экспериментах «ОКА» и «ГИПЕРОН» на протонном синхротроне У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ с целью существенного уменьшения рассеяния пучковых частиц с малой энергией. Проведенные с помощью радиоактивных источников измерения показали высокую эффективность использования тонких счётчиков для идентификации заряженных частиц низких энергий, например, в системах контроля загрязнений источниками бета-излучения.

### **Основные узлы детектора для контроля загрязнения $\beta$ -нуклидами**

Как уже отмечалось, фотоумножитель ФЭУ-КС (рис. 1) представляет собой стеклянную колбу диаметром 40 мм с бищелочным фотокатодом  $15 \times 200$  мм<sup>2</sup>, 10-диодной умножительной системой длиной 200 мм и одним или двумя анодами.



Рис. 1. Фотоумножитель ФЭУ-КС.

Такая конструкция фотоумножителя позволяет существенно упростить узел соединения сцинтиллятора с окном фотокатода за счет исключения сложного световода, соединяющего плоский длинный световод с круглым окном фотокатода обычного фотоумножителя. Этот факт может значительно (в несколько раз) улучшить эффективность светособирания сцинтилляционного излучения. Чувствительность фотокатода ФЭУ-КС составляет около 70 – 80 мА / Вт. Величина усиления умножительной системы находится в пределах  $2 \cdot 10^6$  –  $5 \cdot 10^6$ . Рассматриваемый детектор (рис. 2) предназначен для обнаружения  $\beta$ -загрязнений кистей рук. Он состоит из двух отдельных

тонких счетчиков, которые обращены друг к другу тонкими светонепроницаемыми окнами, состоящими из светозащитной пленки толщиной 50 мкм. Сцинтилляционная пластина установлена на окне фотокатода с оптическим контактом, который обеспечивается прозрачной силиконовой прокладкой, изготовленной из кремнийорганического компаунда СИЭЛ [3]. На рис. 3, 4 показано, что сцинтилляционная пластина прижимается к прокладке с помощью «домика» - отражателя из алюминизированного майлара, обеспечивающего дополнительный сбор света, выходящего через фронтальные стенки сцинтиллятора.

Счетчики помещены в корпуса из черного непрозрачного пластика (поливинил-ацеталь) толщиной 6 мм. Габаритные размеры корпуса –  $360 \times 80 \times 225$  мм<sup>3</sup>. Размер рабочего окна детектора –  $200 \times 150$  мм<sup>2</sup>. Расстояние внутри корпуса от пластины сцинтиллятора до рабочего окна примерно 1 см. Рабочее положение прототипа детектора – вертикальное (для измерения загрязнения правой или левой руки).



Рис. 2. Фото проведения процедуры измерения бета-загрязнений с помощью детектора.

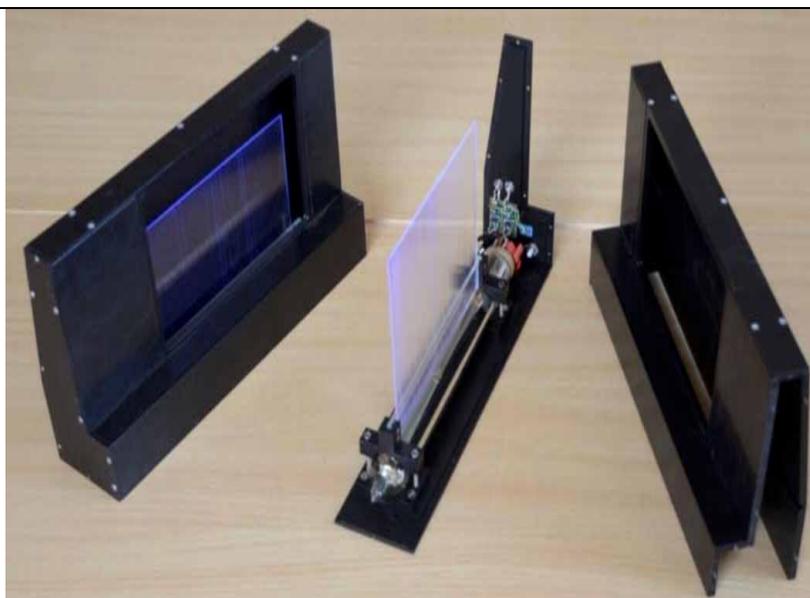


Рис. 3. Вид счетчиков детектора: сняты светозащитные пленки и отражатели левого и правого счетчиков; правый счетчик вынут из корпуса.



Рис. 4. Вид счетчика с домиком - отражателем из алюминизированного майлара.

Для обработки сигналов ФЭУ используется встроенный усилитель-формирователь со схемой совпадений анодных сигналов ФЭУ-КС, выходной импульс – ТТЛ, 200 нс, нагрузка – 50 Ом. Выходной сигнал подается на разъем типа LEMO-00, расположенный на вертикальной стенке корпуса детектора. Там же установлены разъемы для питания усилителя-формирователя (+5В и -5В) и разъем LEMO-0 для высоковольтного питания ФЭУ отрицательной полярности. В дополнительном разьеме LEMO-00 установлен светодиод (405 нм) для проверки работоспособности детектора.

### Измерения с радиоактивными источниками

При измерениях характеристик счётчика использовался радиоактивный источник  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  типа 4СО-201; активностью 121 Бк. Источник размещался в центре рабочего окна на его поверхности. Статистическая погрешность измерения темпа счета  $\beta$ -частиц Эфф. (Эфф=Счет-Фон) составляет порядка 3%, а отношения Эфф/Ф – около 20%.

Таблица 1. Зависимость счетов ФЭУ (имп/с) от напряжения питания (порога дискриминации).

U, В	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300
Фон	0,1	0,4	1,6	3,0	4,3	6,9	9,5	11,0	11,2	17	35
Счет	0,9	4,9	13,7	27,4	40,0	47	52	54	55	60	77
Эфф.	0,8	4,5	12,1	24,4	35,7	40,1	42,5	43	43,8	43	42
Эфф/Фон	7,7	11,1	7,5	8,1	8,3	5,8	4,4	3,9	3,9	2,5	1,2
Счет/Фон	9	12,3	8,6	9,1	9,3	6,8	5,5	4,9	4,9	3,5	2,2

Рекомендуемый диапазон напряжений питания ФЭУ при работе детектора: 1000 – 1200 В. Меньшие величины напряжения обеспечивают лучшее отношение сигнал/фон, а бóльшие – более высокую эффективность регистрации.

Неоднородность счета прототипа детектора (рис. 5) вдоль фотокатода и по высоте сцинтиллятора проверялась с помощью коллимированного источника 1СО-805 (№ 2798), диаметр отверстия комбинированного коллиматора – 4 мм. Время измерений каждой точки – 1 мин. Значения скорости счета за вычетом фона приведены на рис. 5.

Амплитудный спектр ФЭУ с соединенными вместе анодами при регистрации космического фона приведен на рис. 6. Триггерные счетчики размером  $5 \times 8 \text{ см}^2$  установлены в средней части детектора над и под плоскостью сцинтиллятора. Амплитудный спектр хорошо отделяется от пьедестала (199 канал) и его максимум соответствует 523 каналу АЦП. Световой выход детектора, соответствующий среднему значению спектра, составляет  $20,0 \pm 0,9 \text{ ф.э.}$  Световой выход детектора в других единицах –  $110 \text{ ф.э./МэВ.}$

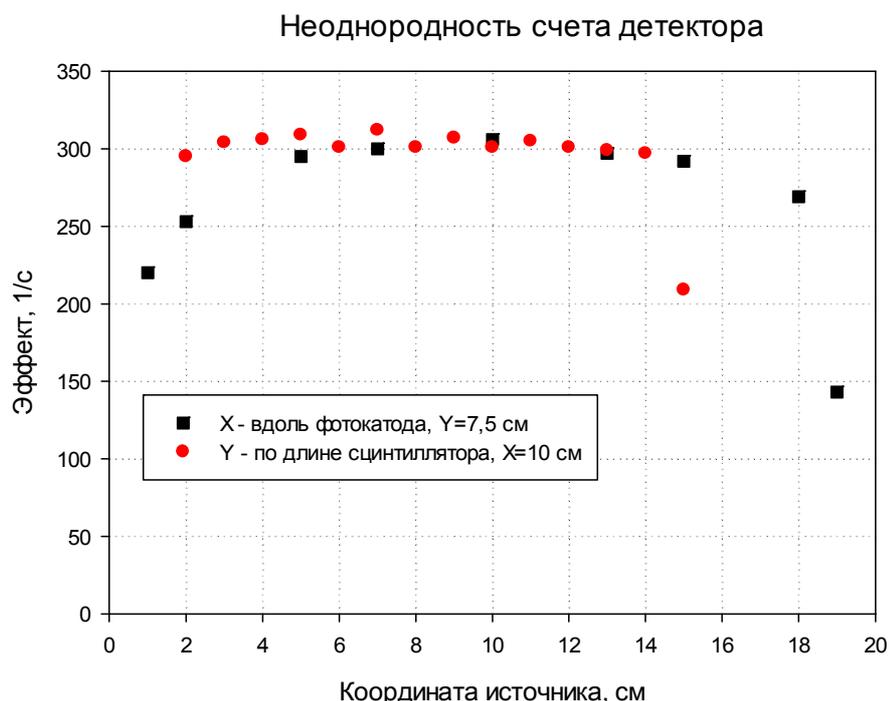


Рис. 5. Неоднородность счёта детектора. Квадратные точки – это зависимость счета от X-координаты источника вдоль фотокатода, находящегося на расстоянии по Y = 7,5 см. Круглые точки – зависимость счета от Y-координаты при X = 10 см.

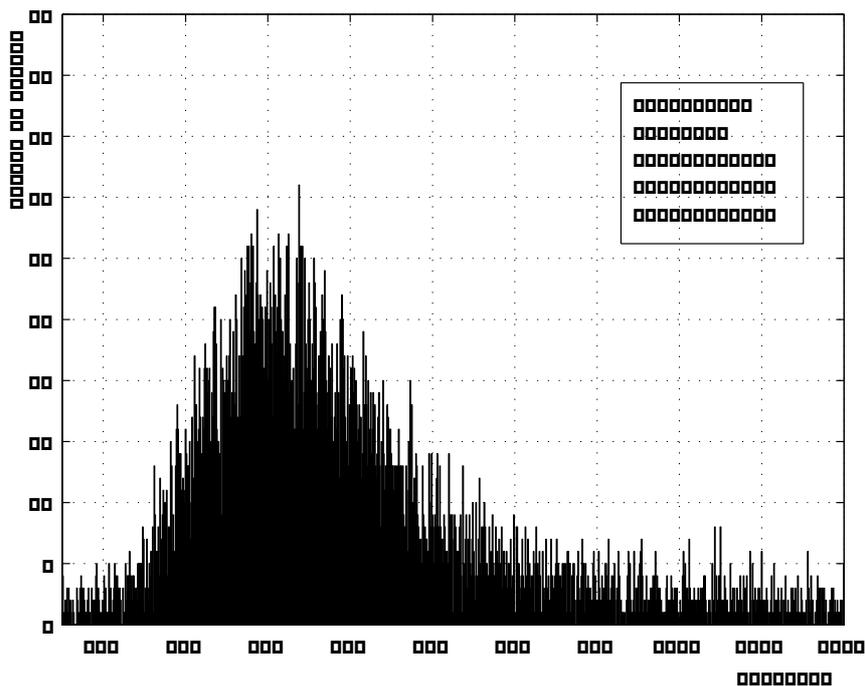


Рис. 6. Амплитудный спектр ФЭУ-КС при напряжении 1100 В.

По требованиям МЭК 61098 [4] размеры рабочих площадей детекторов для контроля загрязнений источниками бета-излучений должны составлять не менее  $120 \times 200 \text{ мм}^2$  для контроля ладоней рук и не менее  $150 \times 300 \text{ мм}^2$  для контроля ступней ног. Одним из важных является требование, чтобы при приближении к плоскости детектора на расстояние 10 мм источника бета-излучения типа 4СО-212 скорость счета на выходе детектора должна увеличиваться не менее чем в 5 раз. В табл. 2 приведена зависимость счёта на выходе детектора (Счёт) от напряжения питания ФЭУ. Из данных таблицы видно, что последнее требование заведомо выполняется, так как на момент измерений активность источника 4СО составляла 128,6 Бк.

Таблица 2. Зависимость счёта (имп/с) от напряжения питания ФЭУ для р/а источника 4СО-212 (128,6 Бк), расположенного на расстоянии 1 см от поверхности окна детектора.

U, В	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
Фон	0	0.5	1.2	2.4	5.0	5.9	8.4	12.2	12.2	13
Счет	0.3	2.0	6.4	18.0	32.1	40.6	45.6	53.8	52.3	51.2
Счет/Фон	-	4.0	5.3	7.5	6.4	6.9	5.4	4.4	4.3	3.9

Загрузочная способность детектора проверялась с помощью набора источников типа  $^{130}\text{Co}$  разной интенсивности (до 300 кБк). В пределах погрешностей значимого насыщения счета тонких счетчиков не наблюдалось. При нагрузочной способности сцинтилляционных счетчиков в десятки мегагерц (например, 60 МГц) и площади рабочей поверхности детектора  $600\text{ см}^2$  линейная конверсия плотности потока частиц в свою очередь составляет  $6 \cdot 10^6$   $\beta$ -частиц/( $\text{см}^2 \cdot \text{мин}$ ), что несравнимо со случаем детекторов на основе газоразрядных счетчиков.

### Зависимость $\gamma / \beta$ режекции от энергии $\gamma$ -квантов

Энергетическая зависимость значений режекции была измерена с помощью набора радиоактивных источников, излучающих  $\gamma$ -кванты в диапазоне энергий 60 кэВ – 1,7 МэВ. В табл. 3 приведены основные данные об используемых источниках и условиях измерения.

Таблица 3. Основные данные используемых  $\gamma$ -источников и условий измерения.

Радиоактивный источник	Энергия фотона, МэВ	Активность источников, Бк	Счет-Фон, имп /с за 10 с	$\gamma/\beta$
$^{241}\text{Am}$	0,06	498500	65	0,00015
$^{57}\text{Co}$	0,122	75000	46	0,00067
$^{159}\text{Gd}$	0,508	6000	22	0,0039
$^{137}\text{Cs}$	0,662	475000	5445	0,012
$^{54}\text{Mn}$	0,835	85000	1455	0,018
$^{60}\text{Co}$	1,173	385000	13165	0,035
$^{88}\text{Y}$	1,7	4400	135	0,031

Чтобы снизить влияние сопровождающих  $\gamma$ -кванты бета-частиц на результаты измерений, перед окном тонкого счетчика был установлен алюминиевый фильтр толщиной 2 мм. Поправки на поглощение  $\gamma$ -квантов в материале фильтра были учтены в полученных результатах.

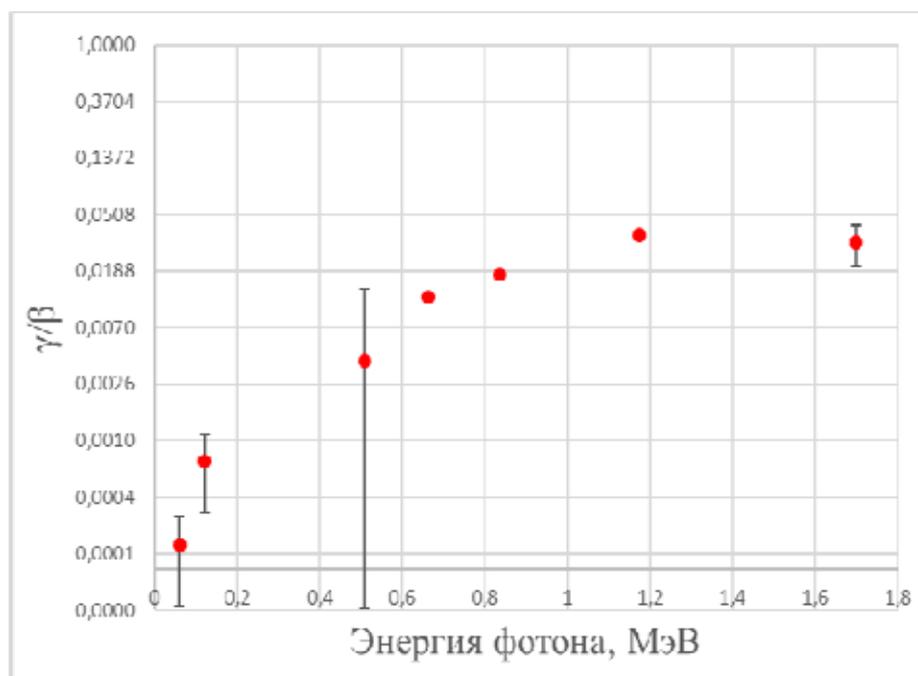


Рис. 7. Зависимость значений  $\gamma/\beta$  режекции от энергии  $\gamma$ -квантов.

Очевидно, что тонкие сцинтилляционные счетчики с ФЭУ-КС и детекторы на их основе в настоящее время имеют самую высокую чувствительность по числу ф.э./МэВ (больше 100) среди других известных детекторов с размерами сцинтилляторов в несколько десятков сантиметров и толщиной от долей до нескольких миллиметров. Такие детекторы, как описанные в [5], основанные на сцинтилляционных пластинах, в которых сбор света осуществляется WLS волокнами, практически в два раза менее чувствительны и, кроме того, имеют большую неоднородность в сборе света, связанную с наличием не сцинтиллирующих волокон в рабочем объеме детекторов.

### Заключение

В настоящее время ведутся исследовательские работы для улучшения работы ФЭУ-КС и детекторов на их основе. Разработан новый стенд для подбора резистивного делителя напряжения ФЭУ, который позволяет с помощью пятилучевого осциллографа одновременно измерять и подбирать оптимальное усиление на нескольких динодах. Благодаря этому удастся получить в амплитудных спектрах выходных сигналов ФЭУ пики от отдельных фотоэлектронов. В свою очередь, это позволяет быстро определить усиление и эффективность регистрации фотонов фотоумножителями. Кроме того, дальнейшая модернизация умножительной системы повысит однородность усиления

ФЭУ-КС детектора вдоль фотокатода. Целью дальнейших исследований, в том числе, является уменьшение толщины сцинтилляторов в тонких счетчиках до величин, не превышающих 0,5 мм, с сохранением полученной на данный момент эффективности регистрации МПР. В результате будет значительно уменьшено многократное рассеяние в тонких счетчиках, используемых в системах мониторинга пучков частиц низких энергий, повышена режекция  $\gamma/\beta$ , и, соответственно, улучшены характеристики детекторов бета-загрязнений на основе тонких счетчиков.

### **Благодарности**

Авторы благодарят А.М. Зайцева за содействие в постановке и проведении работ по ФЭУ-КС, а также В.Ф. Образцова и С.А. Садовского за ценные обсуждения. Работа выполнена в рамках контракта N.4h.44.90.13.1118 от 31.05.2013.

### **Список литературы**

- [1] The Report on the research and development work "Development of detectors based on polystyrene scintillators for radiation monitoring", stage 5, 2014, pp.16-21, State Contract № H.4x.44.90.13.1118 of May 31, 2013 State Atomic Energy Corporation Rosatom and Institute for High Energy Physics, Protvino, R.F.
- [2] Vladimir Rykalin, Valery Brekhovskikh, Sergey Chernichenko, Alexandre Gorin and Vitaliy Semenov. "Development of the Polystyrene Scintillator Technology and Particle Detectors on their Base". Journal of Physical Science and Application 5 (2015) 1043– 1044.
- [3] <http://www.eos.su/ru/products-tech/products/188-silikonovye-kompaundy-siel>
- [4] [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec61098%7Bed2.0%7Db.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61098%7Bed2.0%7Db.pdf)
- [5] The Report on the research and development work "Development of detectors based on polystyrene scintillators for radiation monitoring", stage 4, 2014, pp.23-34, State Contract № H.4x.44.90.13.1118 of May 31, 2013 State Atomic Energy Corporation Rosatom and Institute for High Energy Physics, Protvino, R.F.

*Рукопись поступила 25 октября 2018 г.*

А.М. Горин и др.

Тонкие счетчики большой площади для идентификации заряженных частиц.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 26.10.2018.                      Формат 60 × 84/16.      Цифровая печать.  
Печ.л. 0,75.    Уч.–изд.л. 1,05.                      Тираж 80.      Заказ 17.                      Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2018-17,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2018

---