

ПРОТОТИП СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ВРЕМЯ-ПРОЛЕТНОГО ГОДОСКОПА

В. И. Алексеев¹, В. А. Басков¹, Е. А. Варфоломеева¹, В. А. Дронов¹,
А. И. Львов¹, А. В. Кольцов¹, Ю. Ф. Кречетов², В. В. Полянский¹,
С. С. Сидорин¹

Представлены результаты исследований характеристик прототипа сцинтилляционного время-пролетного годоскопа длиной 71 см. Тестирование прототипа с помощью радиоактивного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ показало, что координатное разрешение и эффективность регистрации зависят от положения источника на рабочей поверхности. Наилучшее значение координатного разрешения и наибольшая величина эффективности регистрации обнаружены в центре модуля и составили $\sigma_x \approx 1.2$ см и $\varepsilon \approx 9\%$, соответственно.

Ключевые слова: сцинтилляционный годоскоп, время-пролета, координатное разрешение, эффективность регистрации.

В 60-х годах начались поиски ранее не наблюдавшихся, относительно легких долгоживущих заряженных частиц ℓ^\pm с массой, лежащей между массой электрона и мюона [1]. Результаты поисков оказались отрицательными. Поэтому неожиданным оказалось появление сведений о наблюдении подобных легких частиц с массами около 9 МэВ на стереофотографиях, сделанных в 2-метровой пропановой пузырьковой камере ОИЯИ [2]. Камера облучалась протонами с энергией 10 ГэВ, а энергия и импульс частиц определялись по динамике изменения кривизны трека в магнитном поле. Эти частицы были названы “аномальными лептонами”, хотя спин частиц в эксперименте не определялся.

С целью нового поиска “аномальных лептонов” на тормозном пучке фотонов с энергией до 500 МэВ ускорителя “Пахра” ФИАН создана экспериментальная установка (рис. 1) [3–5], в которой для определения импульса и энергии частиц, вылетающих из

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

² Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Россия, Дубна, Московская область, ул. Жолио–Кюри, 6.

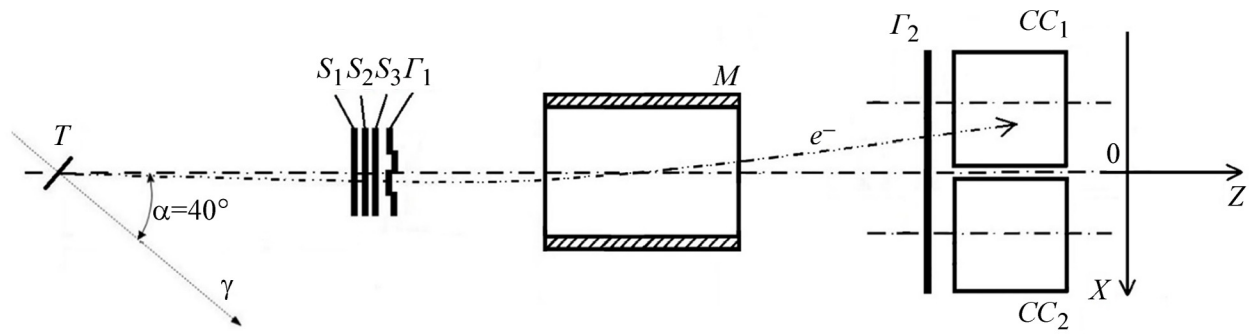


Рис. 1: Схема экспериментальной установки по поиску “тяжелого лептона” на ускорителе ФИАН “Пахра”: T – медная мишень; S_1 – S_3 – сцинтилляционные счетчики; G_1 и G_2 – сцинтилляционные годоскопы; M – постоянный магнит; CC_1 и CC_2 – сцинтилляционные спектрометры.

мишени, используется время-пролетная методика. Для такого определения используются координатные сцинтилляционные годоскопы, определяющие координату частицы в горизонтальной плоскости, и сцинтилляционный спектрометр (CC_1). В ранней версии установки использовался CC_1 размером $200 \times 200 \times 200$ мм³, перед которым располагался годоскоп G_2 , состоящий из 8 каналов (размер канала $20 \times 50 \times 5$ мм³) и “перекрывающий” в горизонтальной плоскости диапазон пространства перед CC_1 , равный 16 см.

Для увеличения энергетического диапазона регистрируемых частиц к существующему CC_1 в горизонтальной плоскости был добавлен дополнительный блок CC_2 таких же размеров. В этом случае область регистрации частиц увеличилась до 40 см. С целью “перекрытия” увеличенной области регистрации частиц и снижения количества каналов регистрации было решено использовать годоскоп с определением координаты прохождения частиц с помощью широко применяемого в экспериментах время-пролетного метода.

Был создан прототип сцинтилляционного время-пролетного годоскопа (СВПГ) (рис. 2), состоящий из одной палочки из оргстекла (1) размером $1.7 \times 71 \times 1$ см³ на основе полиметилметакрилата (ПММА) с добавкой нафталина в качестве сцинтиллятора [6]. Палочка шириной 1 см и высотой 1.7 см просматривалась с противоположных торцов двумя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-85 (4) с делителями напряжений (5), спаянными по стандартной схеме. Все грани палочки отполированы и, кроме торцевых граней, на которых расположены ФЭУ, обернуты металлизированным майларом (2) и светозащитной черной бумагой (3).

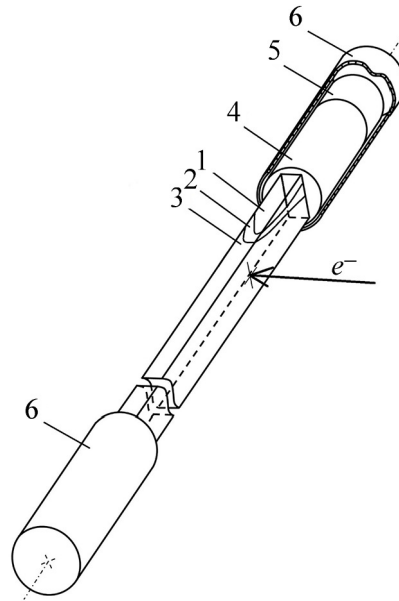


Рис. 2: Схема прототипа СВПП: 1 – сцинтилляционная пластина; 2 – металлизированный майлар; 3 – черная бумага; 4 – ФЭУ; 5 – делитель напряжения ФЭУ; 6 – защитный корпус.

Тестирование прототипа СВПП было осуществлено с помощью радиоактивного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ с максимальной и средней энергией электронов 2.2 МэВ и ~ 1 МэВ, соответственно. Основными целями тестирования являлись определение зависимости координатного разрешения (σ_x) и эффективности регистрации электронов (ε) от положения радиоактивного источника (x) на рабочей грани прототипа относительно фотокатодов ФЭУ, что в дальнейшем должно быть использовано в создании рабочего СВПП с длиной сцинтилляционных палочек или каналов годоскопа такой же или меньшей длины.

Схема тестирования прототипа представлена на рис. 3. За радиоактивным источником $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ располагался свинцовый коллиматор K (толщина 1.5 мм, диаметр отверстия 10 мм) и сцинтилляционный триггерный счетчик S (размер $15 \times 15 \times 1$ мм³) со стандартным делителем напряжения. Прототип располагался за счетчиком S рабочей гранью (1.7×71 см²). Расстояние между K и рабочей гранью составляло не более 1 мм.

Сигнал с триггерного счетчика S являлся сигналом “Start”, который через формирователь Φ_1 и задержку Z_1 подавался на запуск четырехходового время-цифрового преобразователя (ВЦП). На входы “Стоп” через формирователи Φ_2 , Φ_3 и задержки Z_2 , Z_3 подавались сигналы от двух ФЭУ C_l и C_r , расположенных на торцах прототипа.

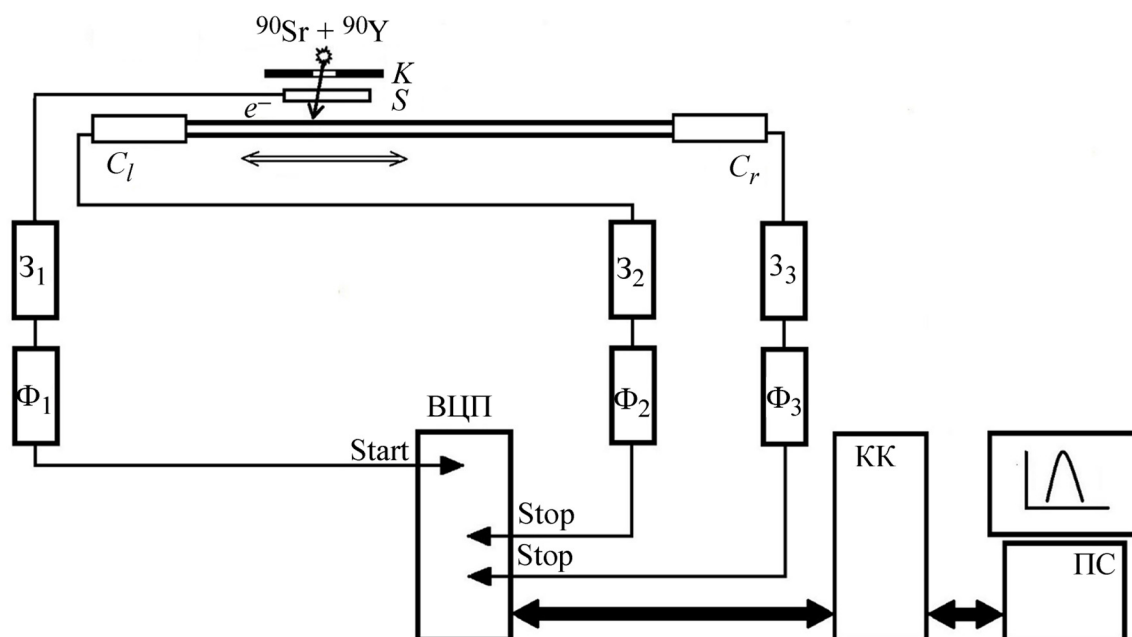


Рис. 3: Схема калибровки прототипа СВПП с помощью радиоактивного источника; (S – триггерный сцинтилляционный счетчик; K – свинцовый коллиматор; C_1 , C_r – каналы прототипа СВПП; Z_1 – Z_3 – блоки временных задержек; Φ_1 – Φ_3 – блоки формирователей со следящим порогом (ФСП); ВЦП – время-цифровой преобразователь; Start – сигнал запуска блока ВЦП; Stop – временные сигналы с каналов C_1 и C_r прототипа СВПП; КК – крейт-контроллер системы САМАС; ПС – персональный компьютер.

Сигнал “Start” являлся сигналом, с помощью которого через крейт-контроллер системы САМАС производилась запись сигналов с ФЭУ модуля в память компьютера (ПС).

Напряжение на делителе напряжения счетчика S составляло $U_S = 1000$ В, время набора рабочей статистики $t = 300$ с, что обеспечивало статистическую точность около 8%. Данная величина напряжения была выбрана с тем расчетом, чтобы отношение рабочего счета (наличие радиоактивного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ перед коллиматором K) к шумовому счету (отсутствие радиоактивного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ перед коллиматором K) составляло приемлемую величину, обеспечивающую указанную статистическую точность. Было определено, что увеличение напряжения на делителе счетчика S ведет к ухудшению отношения и ухудшению точности измерений. В данных измерениях рабочий счет и шумовой счет составляли $N_p \sim 1100$ 1/с и $N_{ш} \sim 3$ 1/с, соответственно.

Важными рабочими характеристиками при работе годоскопа при регистрации заряженных частиц являются величины напряжений на делителях напряжения ФЭУ. Они

определяют эффективность регистрации световой вспышки при прохождении частицы через элемент годоскопа и временные характеристики системы “сцинтиллятор – ФЭУ”.

При тестировании прототипа годоскопа рабочие напряжения на делителях напряжения были определены как $U_l = 1200$ В и $U_r = 1100$ В. При данных напряжениях и положении радиоактивного источника по центру прототипа ($x = 0$) временные спектры левого и правого ФЭУ (C_l и C_r) с помощью варьирования величин задержек Z_2 и Z_3 были “помещены” в центры рабочих диапазонов обоих каналов ВЦП (средние значения каналов временных спектров левого ($\langle T_l \rangle$) и правого ($\langle T_r \rangle$) ФЭУ соответствовали $\langle T_l \rangle \approx \langle T_r \rangle \approx 512$ каналам). Данная процедура была сделана с той целью, чтобы при расположении радиоактивного источника на значительном удалении от центра прототипа (например, при $x \approx \pm 30$ см) временные спектры по основанию полностью укладывались в рабочих диапазонах каналов ВЦП.

На выбор величин напряжений повлияло также следующее предположение: при относительно небольших напряжениях на делителях напряжений ($U \approx 1000 - 1200$ В) ФЭУ регистрируют в большей степени “прямой” свет от электронного трека в продолжительном сцинтилляторе прототипа, то есть в общем количестве регистрируемого света величина света, связанного с внутренним отраженным светом от граней сцинтилляционной пластины, небольшое. При увеличении напряжения ($U > 1200$ В) ФЭУ начинают регистрировать большую долю отраженного света. Однако, несмотря регистрацию большей доли отраженного света, величина флуктуаций в поглощении света модулем должна увеличиваться, что должно вести к увеличению неточности в определении координаты точки регистрации электрона. Исходя из этого предположения, напряжения на делителях напряжений были ограничены величиной $U = 1200$ В. Данное предположение планируется проверить в дальнейших исследованиях.

Типичное распределение координат, например, при расположении радиоактивного источника по центру прототипа ($x = 0$) показано на рис. 4. Координатное разрешение в данной точке без вычета диаметра отверстия коллиматора составило $\sigma_x \approx 2.2$ см.

Распределение координат для каждого положения радиоактивного источника получены в два этапа. На первом этапе, при заданной координате положения радиоактивного источника, определялись спектры времени прихода света от точки взаимодействия электронов с прототипом до обоих ФЭУ. По полученным временным спектрам определялись среднее времена прохождений света ($\langle t_{l(r)} \rangle$) от источника до каждого из ФЭУ. На втором этапе с помощью простой формулы определялась координата положения радиоактивного источника: $x_i = (x_{li} + x_{ri})/2$, где x_{li} и x_{ri} являлись координатами поло-

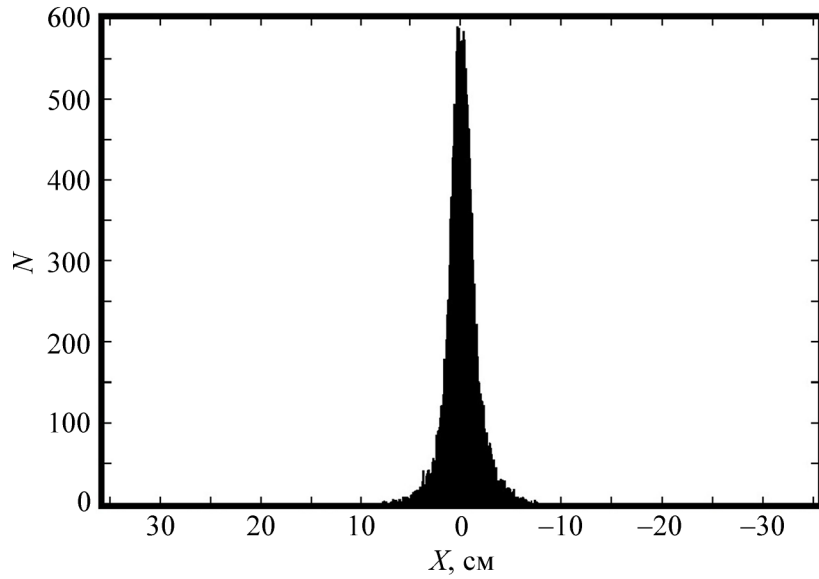


Рис. 4: Распределение координат источника, полученных с помощью прототипа СВПП при положении радиоактивного источника по центру модуля ($x = 0$).

жения источника, определёнными по времени прихода света от точки взаимодействия i электрона с прототипом до каждого из ФЭУ ($x_{li(ri)} = x_0 \cdot (1 - t_{li(ri)}/\langle t_{li(ri)} \rangle)$), где x_0 – центр модуля ($x_0 = 35.5$ см), $t_{li(ri)}$ – время прохождения света от источника до левого (правого) фотокатода ФЭУ, измеренное с помощью ВЦП [канал ВЦП], $\langle t_{li(ri)} \rangle$ – среднее время прохождения света от источника до фотокатода ФЭУ, являющееся средним каналом временного спектра левого (правого) ФЭУ [канал ВЦП]).

На рис. 5 представлена зависимость координатного разрешения прототипа СВПП от положения радиоактивного источника на рабочей грани прототипа (диаметр коллиматора вычтен). Видно, что наилучшее координатное разрешение $\sigma_x \approx 1.2$ см наблюдается в центре модуля ($x = 0$) и ухудшается к торцам до $\sigma_x \sim 3.6$ см. Диапазон изменения координатного разрешения от центра модуля к торцам составил $\Delta\sigma_x \sim 2.4$ см. Можно предположить, что значительные величины координатного разрешения определены значительными флуктуациями света, которые в свою очередь определены большим числом внутренних отражений в длинном сцинтилляторе при прохождении света от точки взаимодействия электронов со сцинтиллятором до ФЭУ.

На рис. 6 представлена зависимость эффективности регистрации электронов прототипом СВПП (ε) от положения радиоактивного источника на рабочей грани прототипа при тех же напряжениях на делителях напряжений ФЭУ ($\varepsilon = (N_{lr}/N) \cdot 100\%$, где N_{lr} –

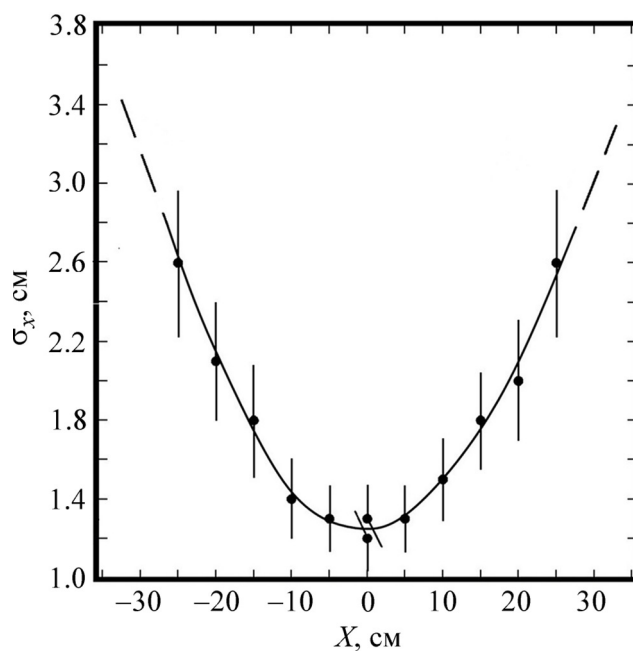


Рис. 5: Зависимость координатного разрешения прототипа СВПП от положения радиоактивного источника на рабочей грани сцинтилляционной палочки.

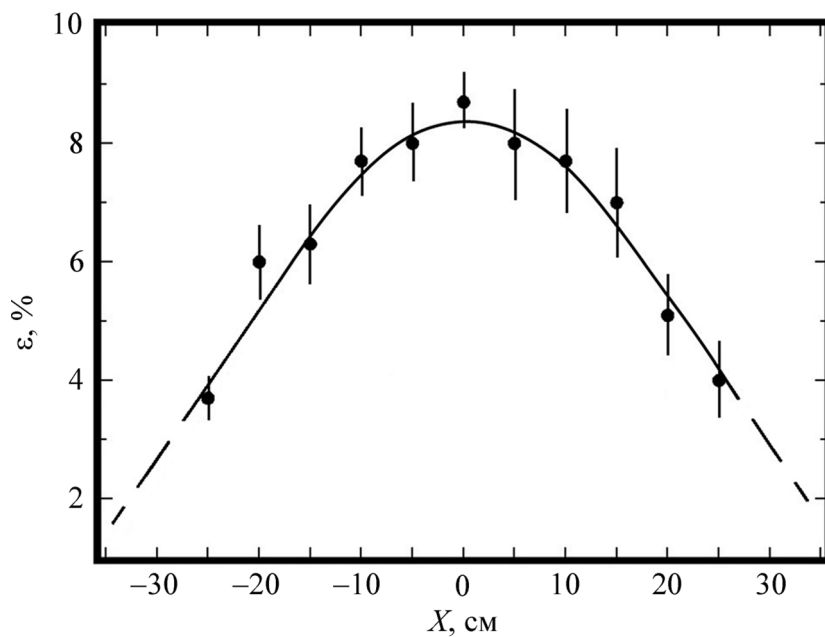


Рис. 6: Зависимость эффективности регистрации электронов прототипа СВПП от положения радиоактивного источника на рабочей грани сцинтилляционной палочки.

число отсчетов при одновременном срабатывании левого и правого ФЭУ прототипа за время набора статистики, N – число отсчетов счетчика S за время набора статистики). Видно, что максимальное значение эффективности регистрации прототипом СВПГ электронов от радиоактивного источника наблюдается в центре прототипа и достигает величины $\varepsilon \sim 9\%$ уменьшаясь к торцам прототипа до величины $\varepsilon \sim 2\%$. Из рис. 6 также видно, что величины ошибок измерений в случае правого ФЭУ несколько выше величин ошибок в случае левого ФЭУ. Это объясняется тем, что ФЭУ были отобраны с примерно одинаковым временным разрешением при напряжениях $U_l = 1200$ В и $U_r = 1100$ В, определяемым по ширине временных спектров обоих ФЭУ на половине высоты, при расположении радиоактивного источника по центру прототипа ($x = 0$). Однако, эффективность регистрации световых вспышек от электронного трека в сцинтилляторе и соответствующее энергетическое разрешение самих ФЭУ при соответствующих напряжениях разные, что и определило разную величину ошибок рис. 6.

Надо отметить, что на рис. 5 и 6 линии, описывающие экспериментальные результаты, проведены для наглядности. Погрешности полученных значений координатного разрешения на рис. 5 определены процедурой фитирования координатных спектров полиномом стандартной программой OriginPro 9.0 и составили 15–20% от значений величин, представленных на рис. 6.

В итоге можно предположить, что значительная величина координатного разрешения и небольшая величина эффективности регистрации прототипа СВПГ определена тем, что средняя энергия электронов радиоактивного источника составляет ~ 1 МэВ и полностью поглощается сцинтилляционной палочкой прототипа. В проводимом эксперименте по поиску “аномальных лептонов” сцинтилляционный спектрометр, находящийся за годоскопом Г, регистрирует энергию заряженных частиц > 3 МэВ. В этом случае через сцинтилляционную палочку СВПГ должна проходить заряженная частица с энергией не менее ~ 5 МэВ, то есть в сцинтилляционной палочке СВПГ толщиной 1 см в среднем должно оставаться ~ 2 МэВ [7]. Это означает, что в эксперименте количество света при регистрации частицы сцинтилляционной палочкой должно увеличиться, и тем самым уменьшиться величина флуктуаций света, регистрируемого обоими ФЭУ. Уменьшение флуктуаций света должно привести к улучшению величины координатного разрешения и увеличению эффективности регистрации.

В результате исследования характеристик прототипа СВПГ длиной 71 см на основе нафталина в метилметакрилате на электронах радиоактивного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ наилучшее координатное разрешение и наибольшая величина эффективности реги-

страции обнаружены в центре прототипа: $\sigma_x = 1.2$ см и $\varepsilon \sim 9\%$, соответственно. На торцах прототипа координатное разрешение и эффективность регистрации составили $\sigma_x \sim 3.6$ см и $\varepsilon \sim 2\%$, соответственно. Основным результатом исследования прототипа СВПП явилась способность прототипа на основе предложенного метода времени пролета определять точку прохождения заряженной частицы, что может быть использовано в создании рабочего СВПП с длиной сцинтилляционных палочек или каналов годоскопа большей или меньшей длины. Сцинтилляционный время пролетный годоскоп будет способен перекрыть значительную величину апертуры сцинтилляционного спектрометра в установке по поиску “аномальных лептонов” и иметь меньшее количество каналов. Можно также отметить, что при создании рабочего СВПП необходимо провести более детальные исследования характеристик годоскопа в зависимости от напряжений на делителях напряжений ФЭУ и провести предварительное моделирование.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. С. Белоусов, С. В. Русаков, Е. И. Тамм, П. А. Черенков, ЖЭТФ **37**(6(12)), 1613 (1959).
- [2] М. Х. Аникина, В. А. Никитин, В. С. Рихвицкий, Препринт ОИЯИ Р1-2022-62 (Дубна, 2023).
- [3] V. I. Alekseev, V. A. Baskov, V. A. Dronov, et al., A search for new light charged particles in photoproduction. EPJ Web of Conferences (Baldin ISHEPP XXIV), **204**, 08009 (2019). <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920408009>.
- [4] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(1), 18 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620070027>.
- [5] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., ПТЭ № 1, 40 (2021). <https://doi.org/10.31857/S003281622101002X>.
- [6] М. Н. Медведев, *Сцинтилляционные детекторы* (Атомиздат, Москва, 1977).
- [7] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., ПТЭ № 5, 1 (2020). <https://doi.org/10.31857/S0032816220050079>.

Поступила в редакцию 16 марта 2023 г.

После доработки 5 июля 2023 г.

Принята к публикации 6 июля 2023 г.