

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ ГОДОСКОП

© 2024 г. В. И. Алексеев^a, В. А. Басков^{a,*}, Е. А. Варфоломеева^a,
В. А. Дронов^a, А. И. Львов^a, А. В. Кольцов^a, Ю. Ф. Кречетов^b,
В. В. Полянский^a, С. С. Сидорин^a

^aФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53

^bОбъединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru, paxra1@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.

После доработки 28.06.2023 г.

Принята к публикации 07.07.2023 г.

Представлены результаты исследований характеристик модуля сцинтилляционного времяпролетного годоскопа длиной 50 см. Определено, что координатное разрешение и эффективность регистрации модуля зависят от напряжений на делителях напряжений фотоэлектронных умножителей и расстояния от точки прохождения частицы до фотоэлектронных умножителей. Тестирования модуля с помощью пучка вторичных электронов ускорителя “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН с энергией 20 МэВ и с помощью радиоактивного источника $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ показали, что минимальные значения координатного разрешения составили $\sigma_x \approx 0.1$ см и $\sigma_y \approx 1.30$ см соответственно, а эффективность регистрации достигает величины $\varepsilon \approx 53\%$.

DOI: 10.31857/S0032816224010036, EDN: GBJZXE

1. ВВЕДЕНИЕ

С целью нового поиска аномальных лептонов, начавшегося еще в 60-х годах, на тормозном пучке фотонов с энергией до 500 МэВ ускорителя “Пахра” ФИАН создана экспериментальная установка (рис. 1) [1], в которой для определения импульса и энергии частиц, вылетающих из мишени, используется времяпролетная методика. Для определения импульса и энергии частиц используются координатные сцинтилляционные годоскопы (Γ_1 и Γ_2), определяющие координату частицы в горизонтальной плоскости, и сцинтилляционный спектрометр. В ранней версии установки использовался сцинтилляционный спектрометр размером $200 \times 200 \times 200$ мм³, перед которым располагался Γ_2 , состоящий из 8 каналов (размер канала $20 \times 50 \times 5$ мм³) и перекрывающий в горизонтальной плоскости область перед сцинтилляционным спектрометром, равную 16 см.

Для увеличения энергетического диапазона регистрируемых частиц к существующему сцинтилляционному спектрометру в горизонтальной плоскости был добавлен дополнительный блок таких же размеров. В этом случае область регистрации частиц увеличилась до 40 см. Для перекрытия увеличенной области регистрации частиц и снижения количества каналов регистрации было решено использовать годоскоп с определением координаты прохождения частицы времяпролетным методом.

2. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ
ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ ГОДОСКОП

С этой целью был создан сцинтилляционный времяпролетный годоскоп (СВПГ) (рис. 2), состоящий из 8 каналов, представляющих из себя набор из 8 палочек 3 или модулей из оргстекла на основе полиметилметакрилата (ПММА) с добавкой нафталина

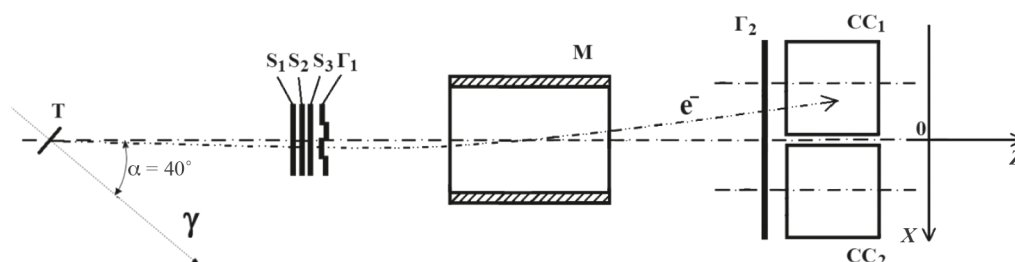


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по поиску тяжелого лептона на ускорителе ФИАН "Пахра": Т — медная мишень; $S_1 - S_3$ — сцинтилляционные счетчики; Γ_1 и Γ_2 — сцинтилляционные годоскопы; М — постоянный магнит; CC_1 и CC_2 — сцинтилляционные спектрометры.

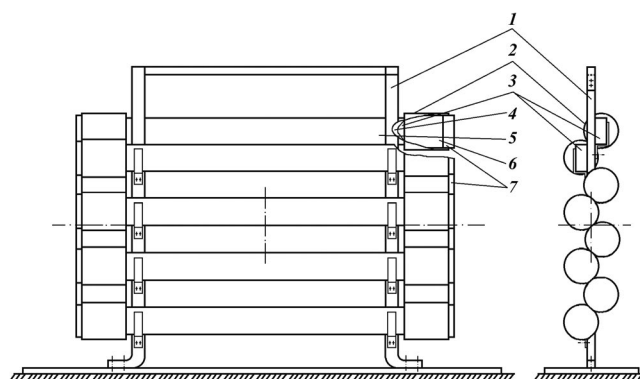


Рис. 2. Схема СВПГ: 1 — дюралюминиевый каркас, 2 — светозащитный кожух ФЭУ, 3 — сцинтилляционная палочка, 4 — металлизированный майлар, 5 — черная бумага, 6 — ФЭУ-85, 7 — делитель напряжения ФЭУ.

в качестве сцинтиллятора [2]. Размер каждого модуля $1.7 \times 50 \times 1 \text{ см}^3$. Модули расположены друг за другом в вертикальной плоскости, рабочие грани модуля шириной 1.7 см и длиной 50 см ($1.7 \times 50 \text{ см}^2$) располагаются параллельно выходной грани межполюсного промежутка магнита М. Каждый модуль с противоположных торцов шириной 1 см и высотой 1.7 см просматривается двумя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-85 6 с делителями напряжений 7, спаянными по стандартной схеме. Все грани модуля отполированы и, кроме торцевых граней, на которых расположены ФЭУ, обернуты металлизированным майларом 4 и светозащитной черной бумагой 5.

3. КАЛИБРОВКА СВПГ РАДИОАКТИВНЫМ ИСТОЧНИКОМ $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

Предварительно с помощью радиоактивного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ с максимальной и средней

энергией электронов 2.2 МэВ и около 1 МэВ соответственно были исследованы характеристики единичного модуля. Основными целями тестирования являлись определение зависимости координатного разрешения (σ_x) и эффективности регистрации электронов (ϵ) от напряжений на ФЭУ (левого U_l и правого U_r) и положения радиоактивного источника (х) на рабочей грани модуля.

Схема тестирования модуля с помощью радиоактивного источника представлена на рис. 3а. За радиоактивным источником R располагался свинцовый коллиматор К (толщина 1.5 мм, диаметр отверстия 10 мм) и сцинтилляционный триггерный счетчик S_1 (размер $15 \times 15 \times 1 \text{ мм}^3$) со стандартным делителем напряжения. Модуль располагался за счетчиком S_1 с рабочей гранью $1.7 \times 50 \text{ см}^2$. Расстояние между К и рабочей гранью составляло не более 1 мм.

Сигнал *Start* с триггерного счетчика S_1 через формирователь Φ_1 и задержку Z_1 подавался на запуск 4-входового время-цифрового преобразователя (ВЦП) (рис. 3а). На входы *Анализ* через формирователи Φ_2 , Φ_3 и задержки Z_2 , Z_3 подавались сигналы от двух ФЭУ, C_1 и C_2 , расположенных на торцах модуля. Сигнал *Start* также являлся сигналом, с помощью которого через крейт-контроллер системы САМАС проводилась запись сигналов с ФЭУ модуля в память компьютера (ПС). Время набора статистики составляло $t = 300 \text{ с}$. При напряжении $U_{S1} = 1000 \text{ В}$ на делителе напряжения счетчика S_1 рабочий счет (наличие радиоактивного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ перед коллиматором К) и шумовой счет (отсутствие радиоактивного

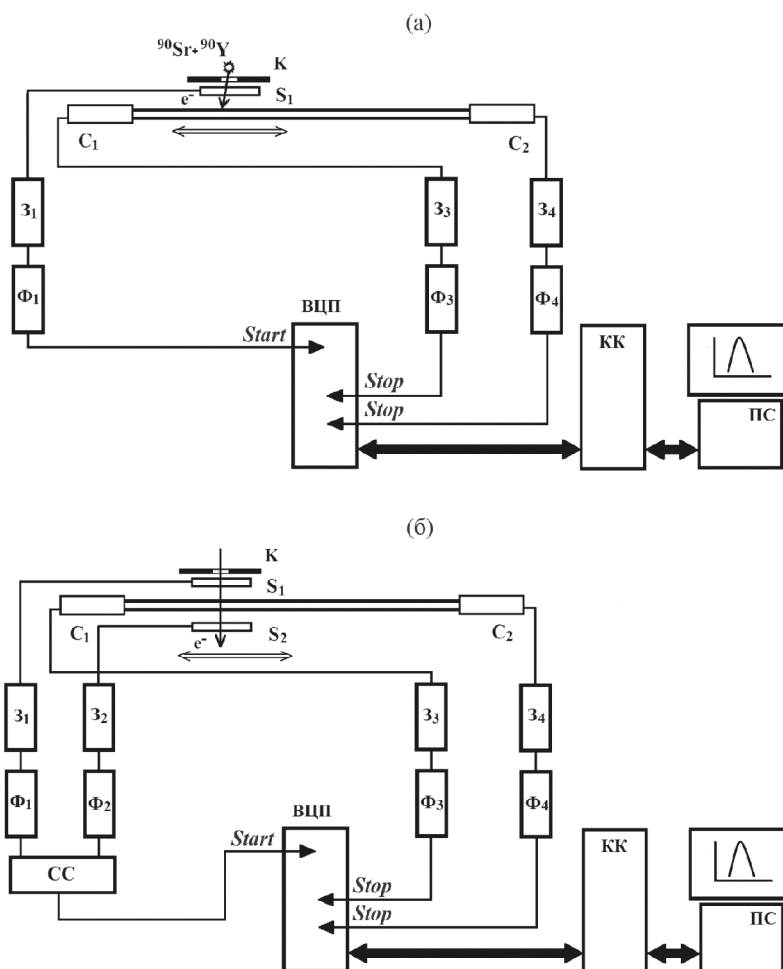


Рис. 3. Схемы калибровки СВПГ: **а** — калибровка с помощью радиоактивного источника; **б** — калибровка с помощью вторичного электронного пучка. S_1 и S_2 — триггерные сцинтилляционные счетчики; К — свинцовый коллиматор; C_1, C_2 — каналы СВПГ; $З_1$ – $З_4$ — блоки временных задержек; Φ_1 – Φ_4 — блоки формирователей со следящим порогом; СС — схема совпадений; ВЦП — время-цифровой преобразователь; Start — сигнал запуска блока ВЦП; Stop — временные сигналы с каналов C_1 и C_2 СВПГ; КК — крейт-контроллер системы САМАС; ПС — персональный компьютер.

источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ перед коллиматором К) составляли $N_p \sim 1100 \text{ с}^{-1}$ и $N_{\text{ш}} \sim 3 \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Типичное распределение координат при расположении радиоактивного источника по центру модуля ($x = 0$) показано на рис. 4а. Координатное разрешение в данной точке без вычета диаметра отверстия коллиматора составило $\sigma_x = \sigma_{\text{Sr}+\text{Y}} \approx 2.3 \text{ см}$. Распределения координат получены в два этапа. На первом этапе при заданной координате положения радиоактивного источника (в данном случае $x = 0$) определялись спектры времени прихода света от точки взаимодействия электронов с модулем до обоих ФЭУ. По полученным временным спектрам определялись средние 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: $x = (x_l + x_r)/2$, где x_l и x_r — координаты положения источника, определенные по времени прихода света от точки взаимодействия электрона с модулем до каждого из ФЭУ ($x_{l(r)} = x_0(1 - t_{l(r)}/\langle t_{l(r)} \rangle)$), где x_0 — положение источника по центру модуля ($x_0 = 25 \text{ см}$), $t_{l(r)}$ — время прохождения света от источника до левого (правого) фотокатода ФЭУ, измеренное с помощью ВЦП (канал ВЦП), $\langle t_{l(r)} \rangle$ — среднее время прохождения света от источника до фотокатода ФЭУ, являющееся средним каналом временного спектра левого (правого) ФЭУ (канал ВЦП).

На рис. 5 представлены зависимости координатного разрешения модуля СВПГ (σ_x) от напряжения на делителях напряжения ФЭУ (1 – левого, 2 – правого) при положении радиоактивного источника по центру модуля $x = 0$. Диаметр коллиматора К на данном и последующих рисунках вычтен. Видно, что с увеличением напряжений на делителях напряжений ФЭУ координатное разрешение СВПГ ухудшается. Можно предположить, что хорошее координатное разрешение ($\sigma_x \approx 1.0 - 1.2$ см) при относительно небольших напряжениях ($U \approx 800 - 1100$ В) связано с регистрацией ФЭУ прямого света от электронного трека в сцинтиляторе модуля, т. е. в общем количестве регистрируемого света величина света, связанного с внутренним отраженным светом от граней сцинтиляционной пластины, небольшая. При увеличении напряжения ($U > 1100$ В) ФЭУ начинают регистрировать более слабый отраженный свет и, несмотря на увеличение общей величины отраженного света, число флуктуаций в поглощении света модулем увеличивается, что ведет к увеличению неточности в определении координаты точки регистрации электрона.

На рис. 6 представлена зависимость эффективности регистрации электронов модулем СВПГ (ϵ) от напряжений на делителях напряжений ФЭУ при $U = U_1 = U_2$ и $x = 0$

$$\epsilon = (N_{lr} / N) \cdot 100\%,$$

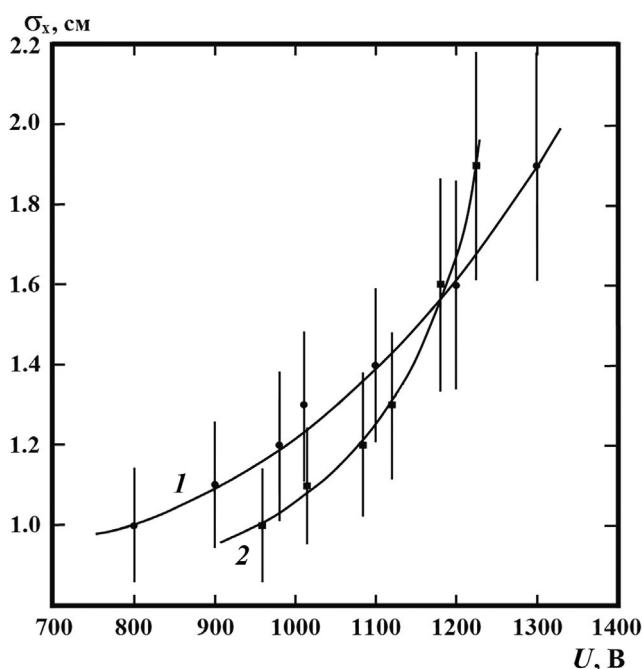


Рис. 5. Зависимости координатного разрешения модуля СВПГ от напряжений на делителях напряжения ФЭУ (1 – левого, 2 – правого) при положении радиоактивного источника по центру модуля ($x = 0$).

где N_{lr} – число отсчетов при одновременном срабатывании левого и правого ФЭУ СВПГ за время набора статистики, N – число отсчетов счетчика S также за время набора статистики. Видно, что, начиная с напряжения $U \approx 1000$ В, зависимость ϵ от U имеет тенденцию выхода на “плато”

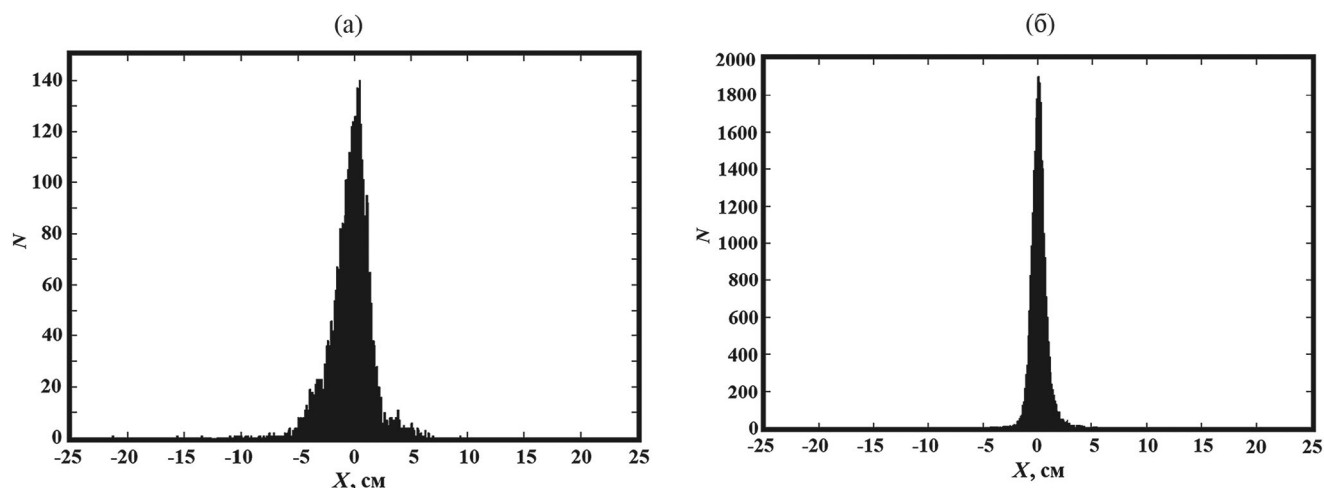


Рис. 4. Распределение координат, полученных с помощью модуля СВПГ, при положении по центру модуля ($x = 0$) радиоактивного источника (а) и счетчиков S_1 и S_2 в случае прохождения через СВПГ электронов с энергией 20 МэВ. (б).

с величиной $\varepsilon \sim 9\%$. Ошибки величин ε (кривая 1) не превысили примерно 5%.

На рис. 7 представлено изменение σ_x модуля СВПГ в зависимости от положения радиоактивного источника на рабочей грани модуля 1 при напряжениях на делителях напряжения ФЭУ $U_1 = 1010$ В (кривая 1) и $U_r = 1120$ В (кривая 2). Видно, что наилучшее координатное разрешение $\sigma_x \approx 1.3$ см наблюдается в центре модуля ($x = 0$) и ухудшается к торцам до $\sigma_x \sim 2.2$ см. Диапазон изменения координатного разрешения от центра модуля к торцам составил $\Delta\sigma_x \sim 1$ см. Таким образом, полученное координатное разрешение оказалось не хуже ширины канала годоскопа, используемого ранее [1].

4. КАЛИБРОВКА СВПГ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 20 МЭВ

Дальнейшие исследования координатного разрешения и эффективности регистрации модуля СВПГ были продолжены с применением пучка вторичных электронов, формируемых магнитом СП-3 ускорителя “Пахра” ФИАН [3].

Схема тестирования модуля с помощью пучка вторичных электронов представлена на рис. 3б. Пучок вторичных электронов с энергией 20 МэВ формировался свинцовым коллиматором К с диаметром входного отверстия 10

мм и регистрировался сцинтилляционными счетчиками S_1 и S_2 размером $15 \times 15 \times 1$ мм³ и модулем СВПГ. В этой схеме сигналом *Start* являлся сигнал со схемы совпадения (СС), которая формировала сигнал от совпадения сигналов со сцинтилляционных счетчиков S_1 и S_2 . Далее, сигнал *Start* подавался на запуск 4-входового ВЦП. Сигналы *Stop*, подаваемые на входы *Анализ* через формирователи Φ_3 , Φ_4 и задержки Z_3 , Z_4 , являлись сигналами от двух ФЭУ, C_1 и C_2 , расположенных на торцах модуля СВПГ.

На рис. 4б представлено распределение координат прохождения вторичных электронов через модуль СВПГ при расположении коллиматора К и счетчиков S_1 и S_2 по центру модуля ($x = 0$). Координатное разрешение в данной точке без вычета диаметра отверстия коллиматора составило $\sigma_x = \sigma_e \approx 1.1$ см.

На рис. 6 показана также зависимость эффективности регистрации модулем СВПГ электронов вторичного электронного пучка 2 от напряжений на делителях напряжений ФЭУ ($U = U_1 = U_r$) при $x = 0$. Видно, что, как и в случае использования радиоактивного источника, начиная с $U \approx 1100$ В, зависимость ε от U имеет тенденцию выхода на “плато” с величиной $\varepsilon \sim 53\%$, т. е. примерно в 6 раз выше, чем при регистрации модулем электронов от радиоактивного источника. Это объясняется тем, что

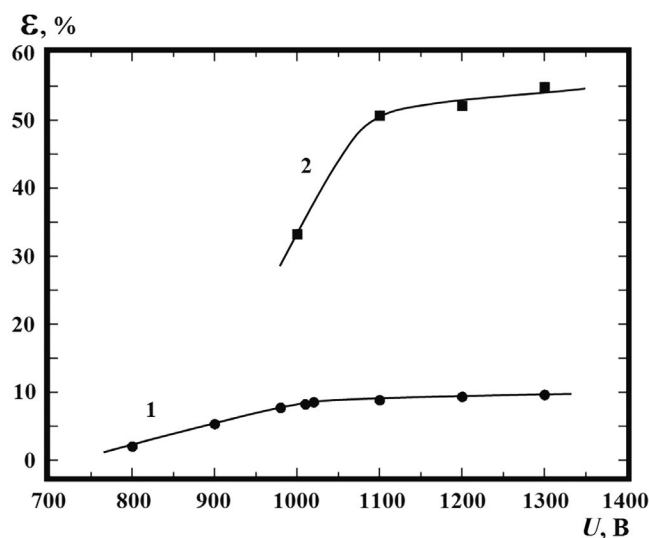


Рис. 6. Зависимость эффективности регистрации электронов модулем СВПГ от напряжений на делителях напряжений ФЭУ при $U = U_1 = U_r$ ($x = 0$) (электроны от радиоактивного источника (1); электронный пучок с энергией 20 МэВ (2)).

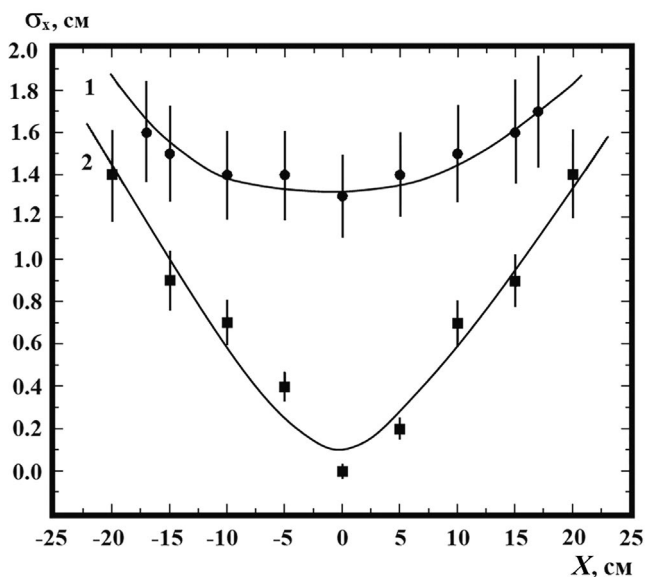


Рис. 7. Зависимость координатного разрешения модуля СВПГ от положения радиоактивного источника (1) и счетчиков S_1 , S_2 (2) на рабочей грани модуля СВПГ.

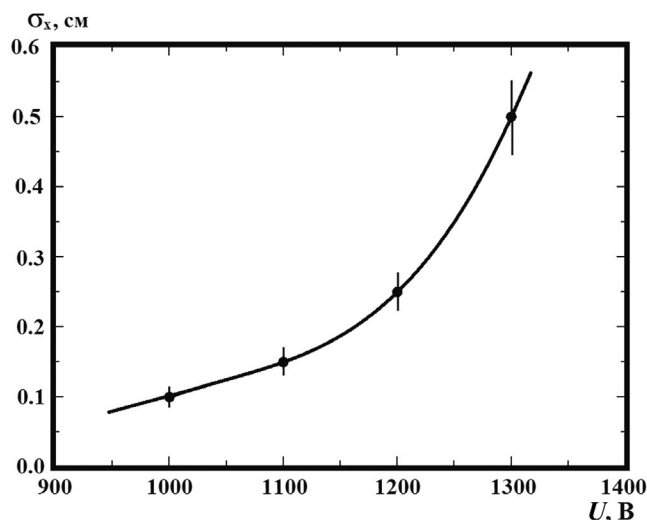


Рис. 8. Зависимость координатного разрешения модуля СВПГ от напряжения на делителях напряжения ФЭУ при $U = U_1 = U_r$ и положении счетчиков S_1 и S_2 по центру модуля ($x = 0$).

средняя энергия электронов радиоактивного источника, равная примерно 1 МэВ, полностью поглощается модулем СВПГ, но при использовании вторичного электронного пучка 20 МэВ средняя энергия, поглощенная модулем толщиной 1 см, составляет около 2 МэВ [4]. Поэтому количество света, приходящего на ФЭУ в случае электронного пучка, больше, что приводит к увеличению ε . Ошибки величин ε (кривая 2) не превысили примерно 1%.

Зависимость σ_x модуля СВПГ от положения счетчиков S_1 , S_2 и К на рабочей грани модуля при напряжениях на делителях напряжения ФЭУ $U = U_1 = U_r = 1100$ В представлена на рис. 7 (кривая 2). Наилучшее координатное разрешение $\sigma_x \approx 0.1$ см наблюдается в центре при $x = 0$ с ухудшением к торцам до $\sigma_x \sim 1.8$ см. Тем не менее полученное координатное разрешение не хуже ширины канала годоскопа, который использовался первоначально [1].

При расположении счетчиков S_1 , S_2 и К по центру модуля СВПГ ($x = 0$) была исследована зависимость σ_x от напряжений на делителях напряжений ФЭУ при $U = U_1 = U_r$ (рис. 8). Видно, что, как и на рис. 5, σ_x уменьшается при увеличении напряжений с $\sigma_x \approx 0.1$ см при $U = 1000$ В до $\sigma_x \approx 0.5$ см при $U = 1300$ В. Применение вторичных электронов со средней энергией 20 МэВ увеличивает σ_x в центре модуля практически на порядок.

Надо отметить, что на рис. 5–8 линии, описывающие экспериментальные результаты, проведены для наглядности. Погрешности полученных значений координатного разрешения на рис. 5, 7, 8 определялись процедурой подгонки координатных спектров полиномом стандартной программы OriginPro 9.0 и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования характеристик модуля СВПГ длиной 50 см на основе нафталина в метилметакрилате на электронах радиоактивного источника $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ и пучке вторичных электронов с энергией 20 МэВ наилучшие координатные разрешения при напряжениях на обоих ФЭУ $U = U_1 = U_r \approx 1100$ В обнаружены в центре модуля и составили $\sigma_x \approx 1.3$ см и $\sigma_x \approx 0.1$ см соответственно. На торцах модуля координатное разрешение хуже и достигает $\sigma_x \sim 2.2$ см и $\sigma_x \sim 1.8$ см соответственно. Эффективность регистрации модуля СВПГ зависит от напряжения на делителях напряжения и достигает максимальной величины $\varepsilon \approx 53\%$.

Таким образом, СВПГ из 8 модулей способен определять точку прохождения заряженной частицы в горизонтальной плоскости с хорошей точностью и удовлетворительной величиной эффективности регистрации заряженных частиц. СВПГ может быть использован в установке для дальнейшего поиска “аномальных лептонов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В., Сидорин С.С. // ПТЭ. 2021. № 1. С. 40.
<https://doi.org/10.31857/S003281622101002X>
2. Медведев М.Н. Сцинтилляционные детекторы, Москва: Атомиздат, 1977.
3. Алексеев В.И., Архангельский А.И., Басков В.А., Батищев А.Г., Власик К.Ф., Гальпер А.М., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Полянский В.В., Сидорин С.С., Утешев З.М. // ПТЭ. 2023. № 6. С. 59.
4. Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Полянский В.В. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 1.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220050079>