

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ ГОДОСКОП

© 2023 г. В. И. Алексеев^а, В. А. Басков^{а,*}, Е. А. Варфоломеева^а,
В. А. Дронов^а, А. И. Львов^а, А. В. Кольцов^а, Ю. Ф. Кречетов^б,
В. В. Полянский^а, С. С. Сидорин^а

^аФизический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^бОбъединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru, paхра1@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 расстоянии 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 $\varepsilon \approx 53\%$.

1. ВВЕДЕНИЕ

С целью нового поиска аномальных лептонов, начавшегося ещё 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

Рис. 1

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 6 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

Рис. 2

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 в качестве сцинтиллятора [2]. Размер каждого модуля $1.7 \times 50 \times 1$ см³. Модули расположены друг за другом в вертикальной плоскости, рабочие грани модуля шириной 1.7 см и длиной 50 см (1.7×50 см²) 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_1 и правого U_r) и положения радиоактивного источника (x) на рабочей грани модуля.

Рис. 3

Схема тестирования модуля с помощью радиоактивного источника представлена на рис. 3а. За радиоактивным источником R располагался свинцовый коллиматор K (толщина 1.5 мм, диаметр отверстия 10 мм) и сцинтилляционный триггерный счетчик S_1 (размер $15 \times 15 \times 1$ мм³) со стандартным делителем напряжения. Модуль располагался за счетчиком S_1 с рабочей гранью 1.7×50 см². Расстояние между K 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-контролер системы САМАС проводилась запись сигналов с ФЭУ модуля в память компьютера (ПС). Время набора статистики составляло $t = 300$ с. При напряжении $U_{S1} = 1000$ В на делителе напряжения счетчика S_1 рабочий счет (наличие радиоактивного источника $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ перед коллиматором K) и шумовой счет (отсутствие радиоактивного источника $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ перед коллиматором K) составляли $N_p \sim 1100$ с⁻¹ и $N_{ш} \sim 3$ с⁻¹ соответственно.

Рис. 4

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 $\sigma_x = \sigma_{\text{Sr+Y}} \approx 2.3$ 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 прохождения 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 ($x_{l(r)} = x_0 \cdot (1 - t_{l(r)}/\langle t_{l(r)} \rangle)$), где x_0 – положение источника по центру модуля ($x_0 = 25$ 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).

Рис. 5

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 K 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 сцинтилляторе модуля, т. е. в общем количестве регистрируемого света величина света, связанного с внутренним отраженным светом от граней сцинтилляционной 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.

Рис. 6

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

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

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

Рис. 7

На рис. 7 представлено изменение σ_x модуля СВПГ в зависимости от положения радиоактивного источника на рабочей грани модуля l 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 входного 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 СВПП.

На рис. 4б представлено распределение координат прохождения вторичных электронов через модуль СВПП 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 СВПП 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 $\epsilon \sim 53\%$, т. е. примерно в 6 раз выше, чем при регистрации модулем электронов от радиоактивного источника. Это объясняется тем, что средняя энергия электронов радиоактивного источника равная примерно 1 МэВ полностью поглощается модулем СВПП, 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 СВПП 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].

Рис. 8

При расположении счетчиков S_1 , S_2 и К по центру модуля СВПП ($x = 0$) 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 СВПП 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 $U = U_1 = U_2 \approx 1100$ В обнаружены в центре модуля и составили $\sigma_x \approx 1.3$ см и $\sigma_y \approx 0.1$ см соответственно. На торцах модуля координатное разрешение хуже и достигает $\sigma_x \sim 2.2$ см и $\sigma_y \sim 1.8$ см соответственно. Эффективность регистрации модуля СВПП зависит от напряжения на делителях напряжения и достигает максимальной величины $\varepsilon \approx 53\%$.

Таким образом, СВПП из 8 модулей способен определять точку прохождения заряженной частицы в горизонтальной плоскости с хорошей точностью и удовлетворительной величиной эффективности регистрации заряженных частиц. СВПП 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.
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>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

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

Рис. 3. Схемы калибровки СВПП: 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 СВПП; $Z_1 - Z_4$ – блоки временных задержек; $\Phi_1 - \Phi_4$ – 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 СВПП; КК – крейт-контроллер системы САМАС; ПС – персональный компьютер.

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

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

Рис. 6. Зависимость эффективности регистрации электронов модулем СВПП 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 СВПП от положения радиоактивного источника (1) и счетчиков S_1, S_2 (2) на рабочей грани модуля СВПП.

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 ($x = 0$).

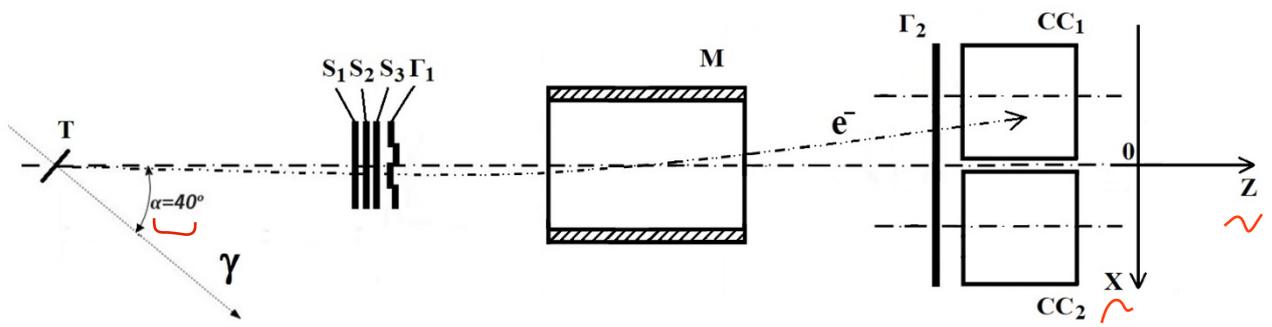


Рис. 1

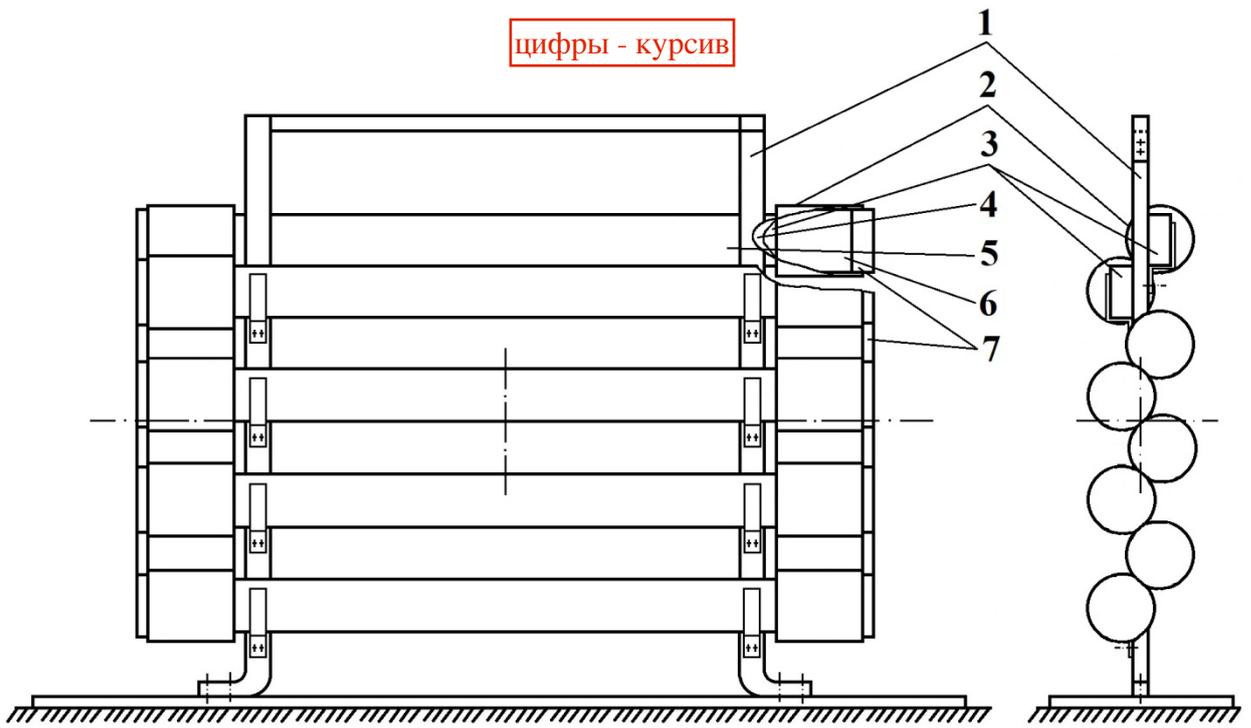
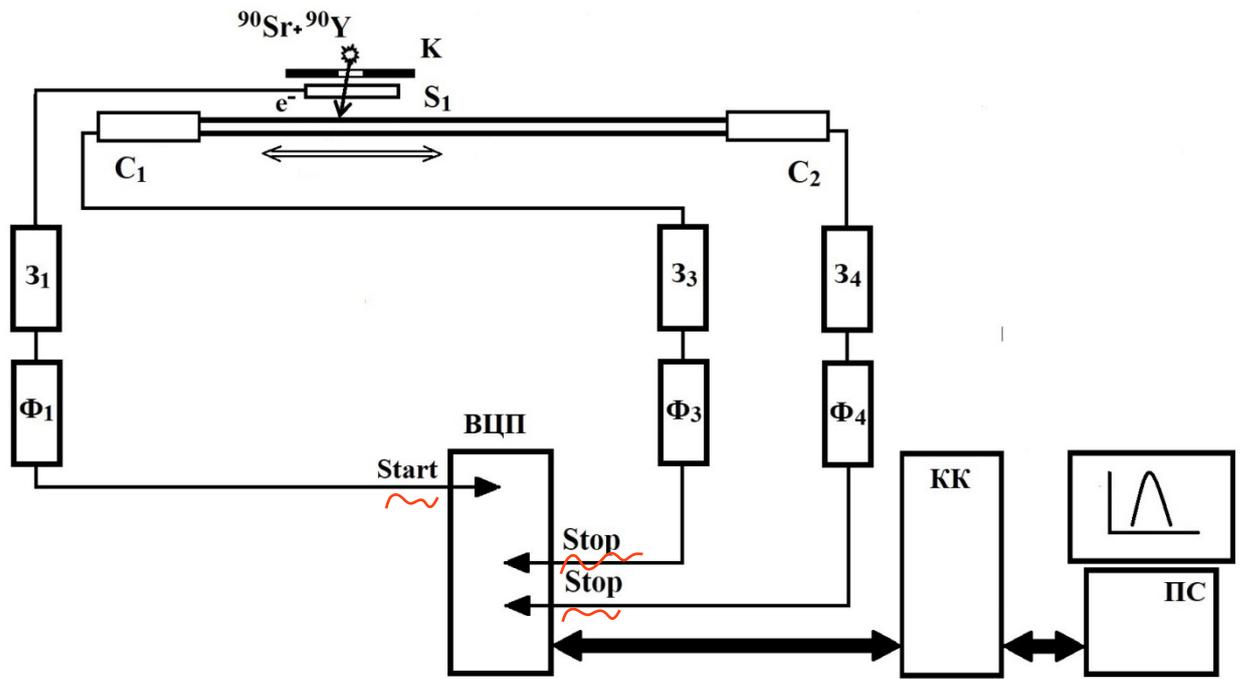
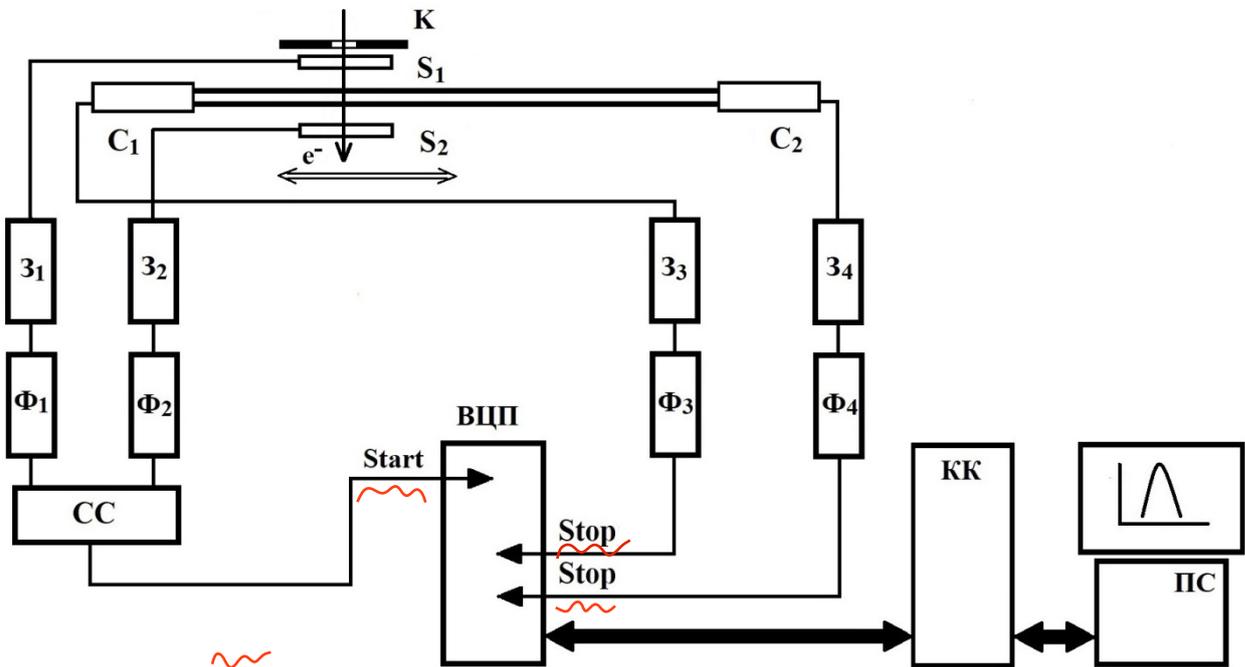


Рис. 2



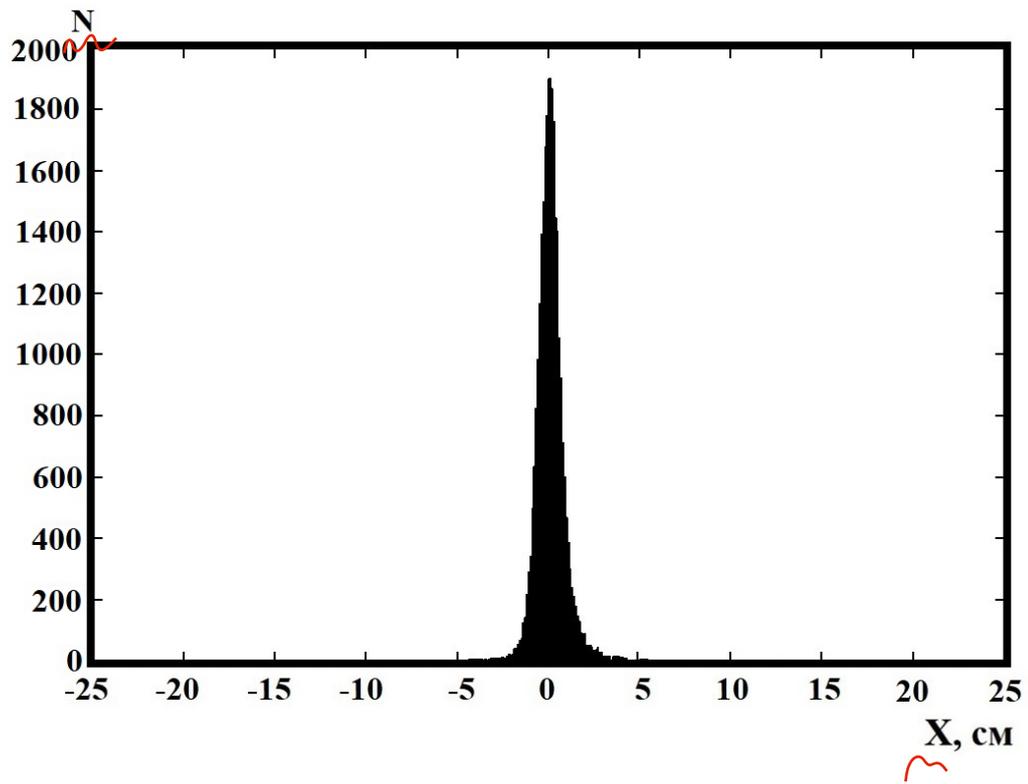
(а)



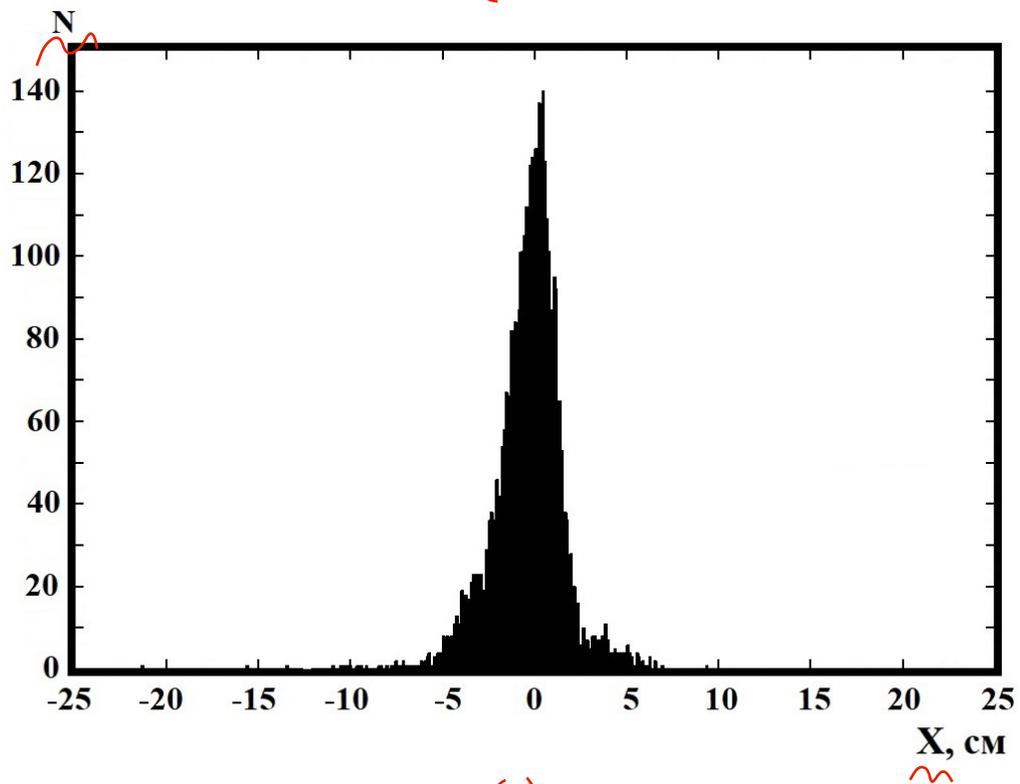
курсив

(б)

Рис. 3



(a)



(б)

Рис. 4

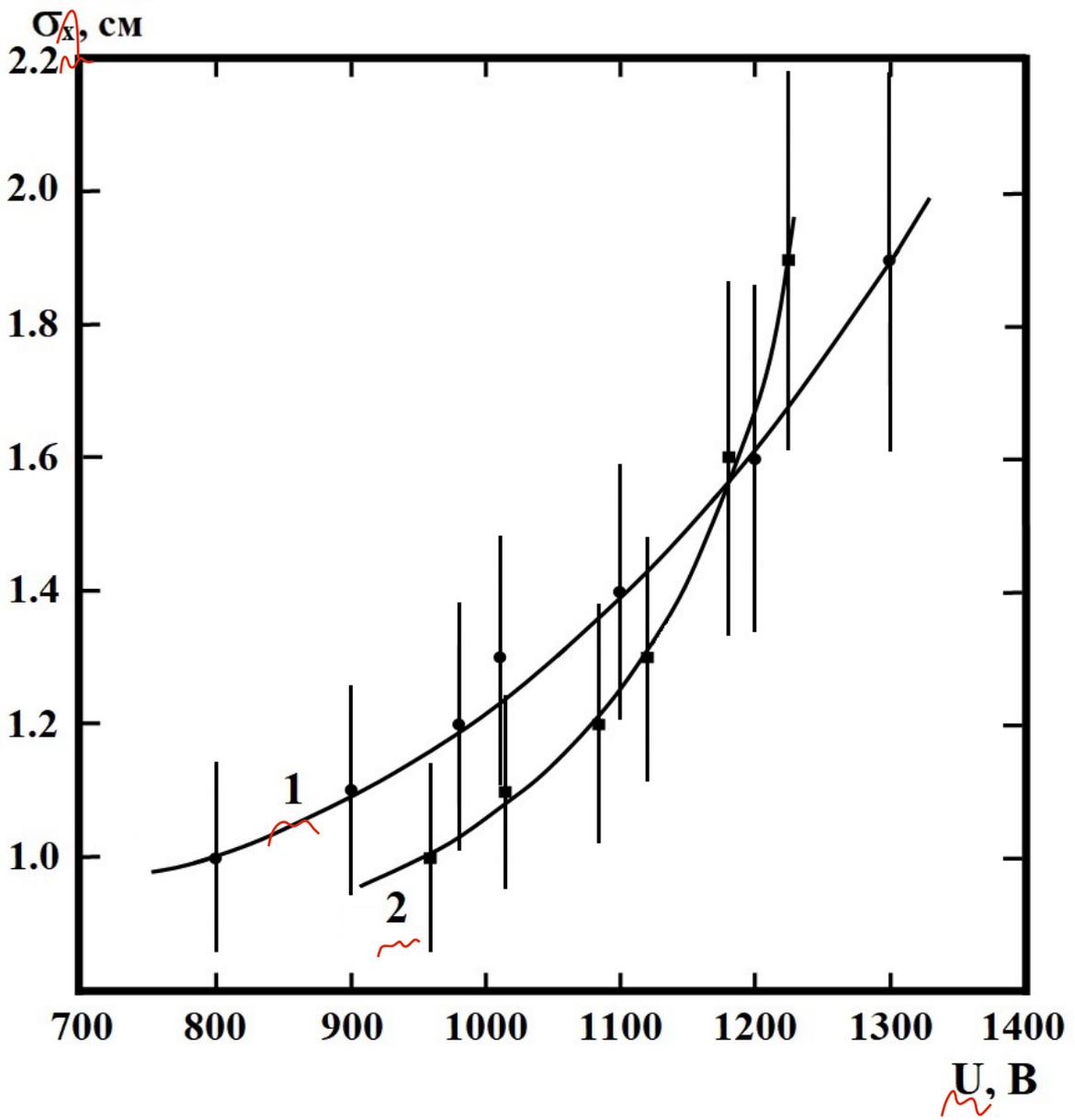


Рис. 5

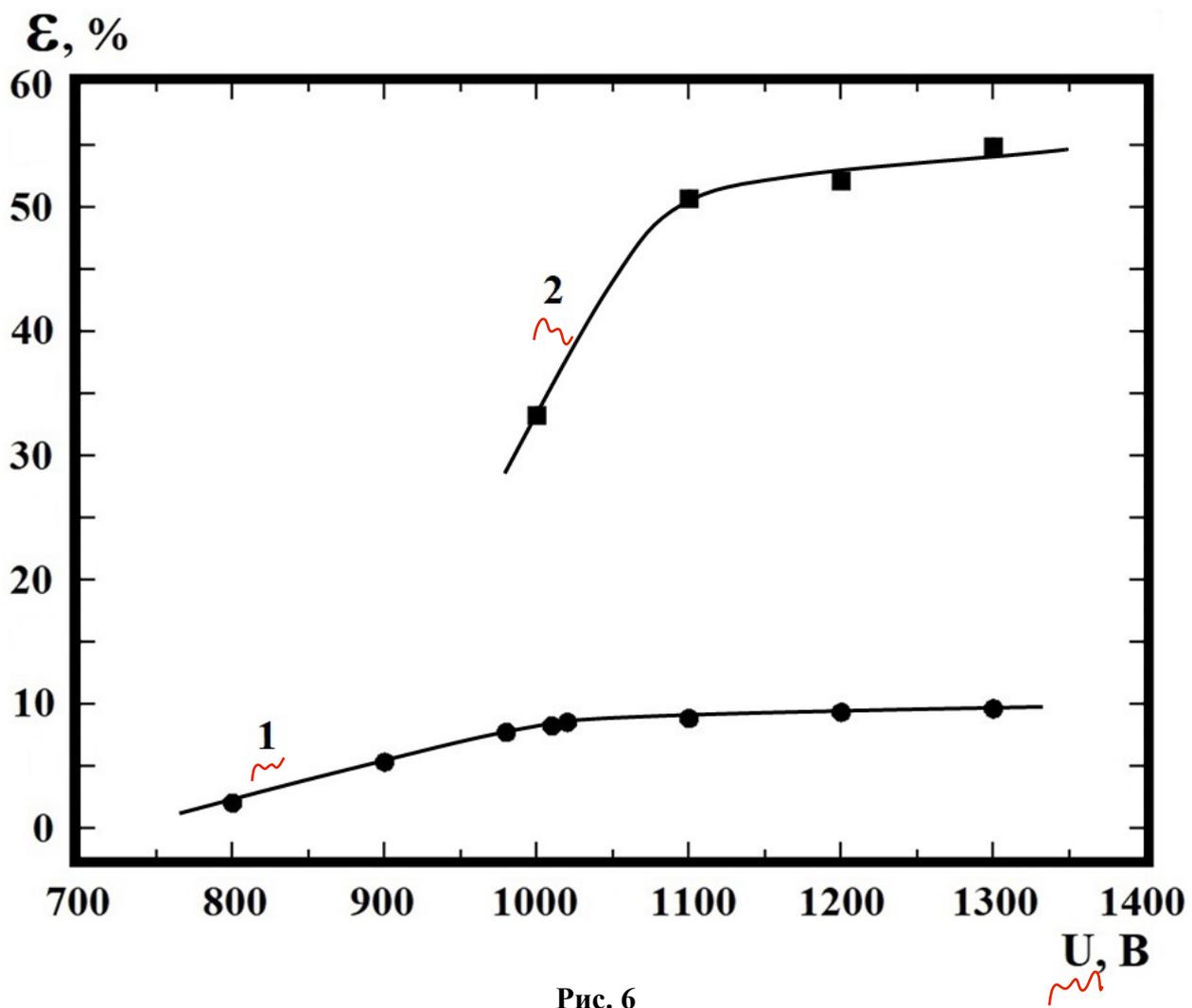


Рис. 6

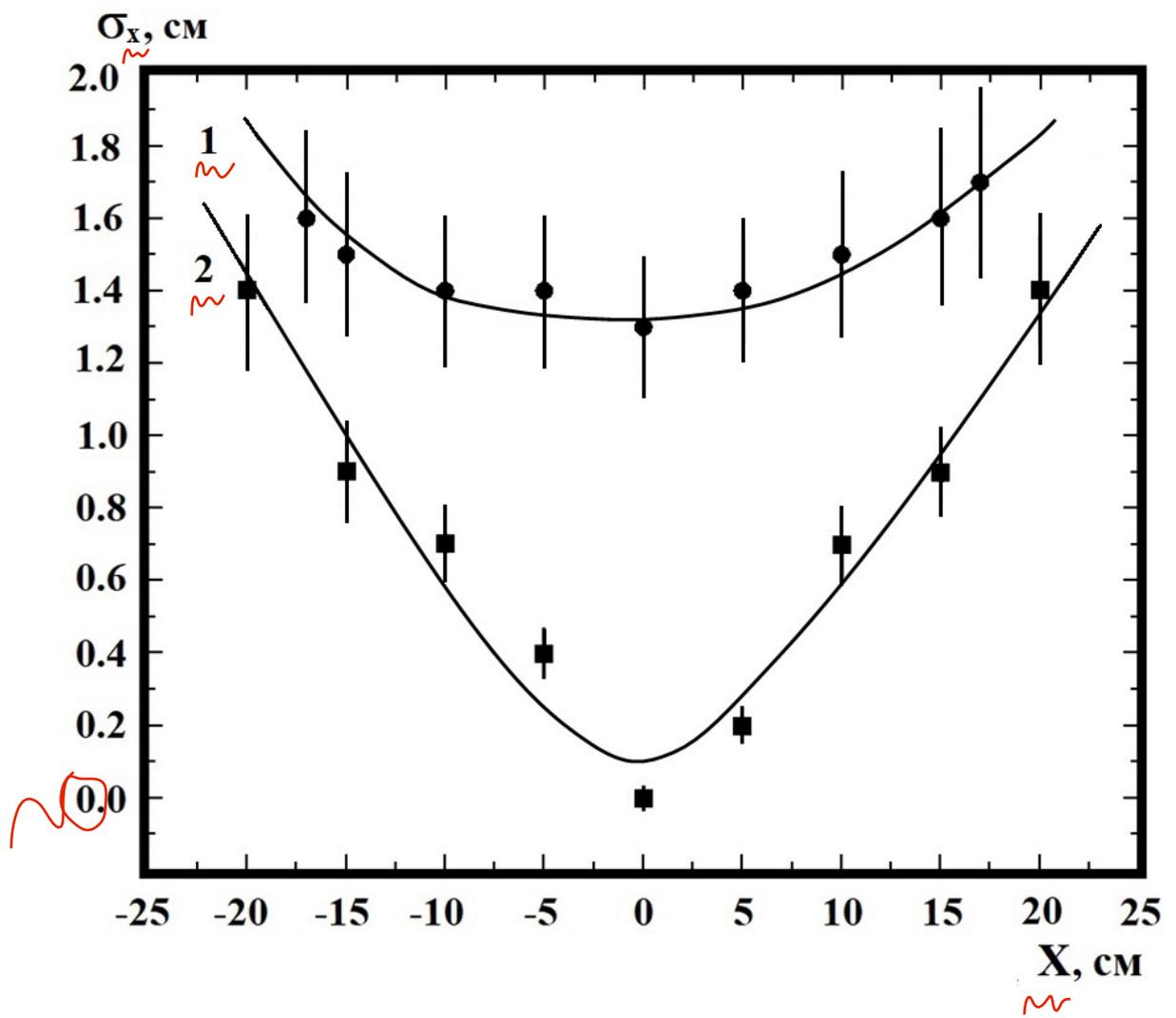


Рис. 7

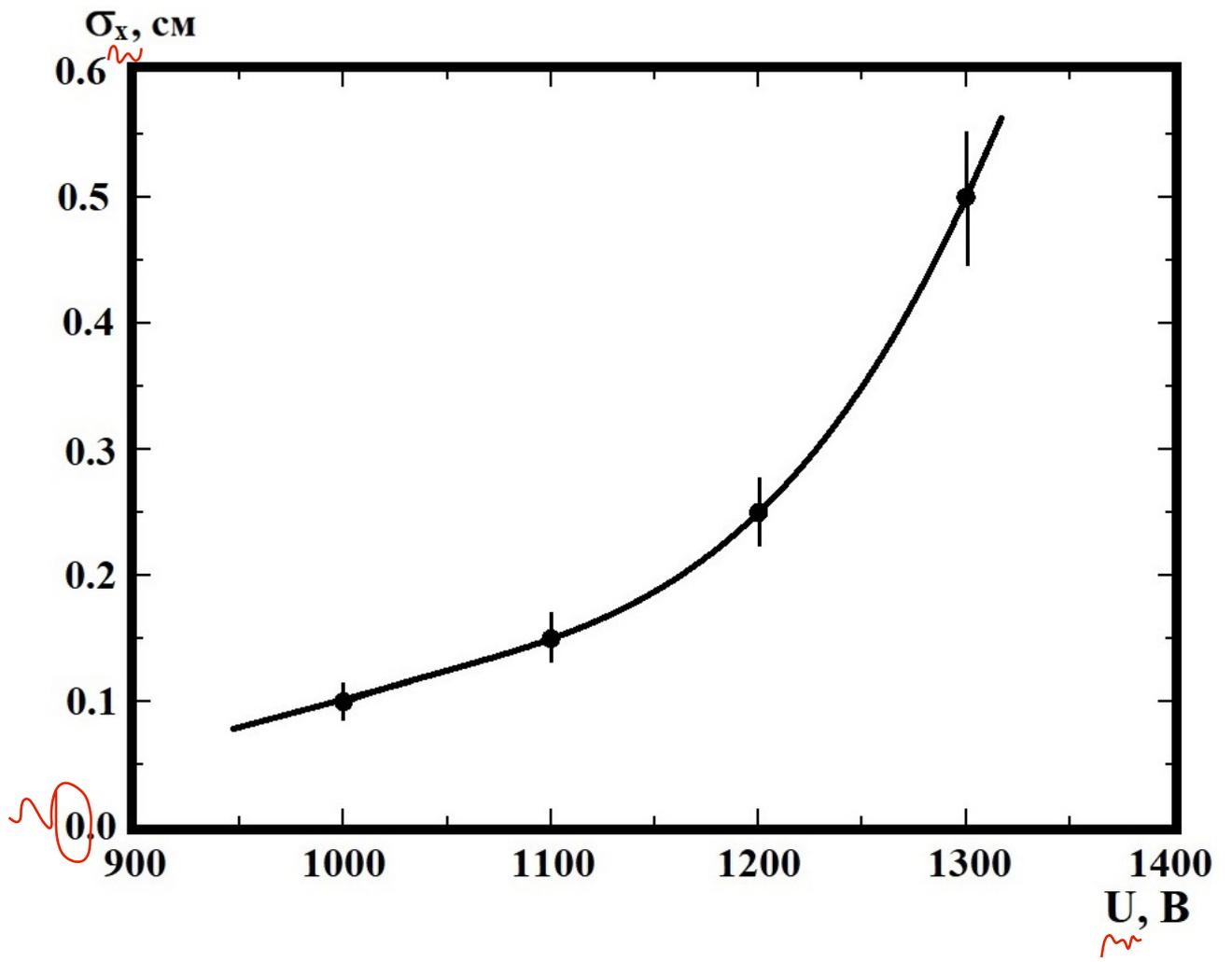


Рис. 8

Для связи с авторами:

Басков Владимир Алексеевич

Тел. 8-926-326-16-63 (моб.)

E-mail: paxra1@mail.ru

E-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Для переводчика:

SCINTILLATION TIME-FLIGHT GODOSCOPE

**V. I. Alekseev¹, V. A. Baskov^{1,#}, V. A. Dronov¹, A. I. L'vov¹, A. V. Koltsov¹,
Yu. F. Krechetov², V. V. Polyansky¹, S. S. Sidorin¹, E. A. Varfolomeeva¹**

¹*P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow,
119991 Russia, 53 Leninsky Ave.*

²*Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Russia, Moscow Region,
Dubna, 6 Joliot-Curie Street*

[#]*E-mail: baskov@x4u.lebedev.ru*

The results of studies of the characteristics of a 50 cm long scintillation time-of-flight hodoscope module designed to determine the coordinates of charged particles in an installation to search for “anomalous leptons” are presented. It is determined that the coordinate resolution of the module depends on the voltages at the voltage dividers of the photoelectronic multipliers and the distance from the point of passage of the particle to the photoelectronic multipliers. Testing the module with the help of a beam of secondary electrons of the Pahra accelerator Physical Institute named after P.N. Lebedev RAS with an energy of 20 MeV and using a ⁹⁰Sr+⁹⁰Y radioactive source showed that the minimum values of the coordinate resolution were $\sigma_x \approx 0.1$ cm and $\sigma_y \approx 1.3$ cm, respectively, in the center of the module.

REFERENCES

1. Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., L'vov A.I., Koltsov A.V., Krechetov Yu.F., Polyansky V.V., and Sidorin S.S. // *Instrum. Exp. Tech.*, 2021, V. 64(1), pp. 34–39. <https://doi.org/10.1134/S0020441221010024>.
2. Medvedev M.N., *Scintillation detectors*, Moscow: Atomizdat, 1977.
3. Alekseev V.I., Arkhangelski A.I., Baskov V.A., Batischev A.G., Vlasik K.F., Galper A.M., Dronov V.A., Lvov A.I., Koltsov A.V., Polyansky V.V., Sidorin S.S., Uteshev Z.M. // *Instrum. Exp. Tech.*, 2023 (in print).

4. Alekseev V.I., Baskov V.A., Dronov V.A., L'vov A. I., Koltsov A.V., Krechetov Yu.F., Polyansky V.V. // *Instrum. Exp. Tech.*, 2020, V. 63(5), pp. 622–626.
<https://doi.org/10.1134/S0020441220050073>.