

будагов Ю. А. и др.

СЗ44.13

Б-903

Б1-1-11178

745/78



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-1-11178

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Ю.А.Будагов, В.Б.Виноградов, А.Б.Йорданов, В.М.Королев, А.С.Курилин, Ю.Ф.Ломакин, В.Г.Одинцов, С.И.Орманджиев, Н.А.Русакович, С.В.Сергеев, Н.С.Толстой, А.А.Феценко, В.Б.Флягин, В.Г.Яцук

Б1-1-11178

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ГАЗОВЫЙ ПОРОГОВЫЙ
ЧЕРЕНКОВСКИЙ СЧЕТЧИК ДЛЯ УСТАНОВКИ "ГИПЕРОН"

(проект)

21 дек 77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория ядерных проблем
Дубна, 1977

Дубна, 1977

А Н Н О Т А Ц И Я

Описана конструкция и вычислены основные параметры создаваемого в ЛЯП ОИЯИ широкоапертурного газового порогового черенковского счетчика высокого разрешения. Расчетное разрешение счетчика $\delta = 2,1 \times 10^{-5}$ при длине радиатора 150 см ($A = 160 \text{ см}^{-1}$). Эффективная толщина (при 1 атм) - 0,05 рад.единиц.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Назначение счетчика
2. Требования к счетчику
3. Конструкция счетчика
4. Выбор элементов и конструктивных параметров счетчика
 - 4.1. Зависимость эффективности от параметров счетчика
 - 4.2. Расчет коэффициента светособирания оптической системы счетчика
 - 4.3. Фотоумножитель
 - 4.4. Зеркало
 - 4.5. Газ
 - 4.6. Параметр A
 - 4.7. Длина счетчика
 - 4.8. Давление газа
5. Расчетная кривая эффективности счетчика
6. Погрешности, вносимые счетчиком, в измерение импульсов и углов вылета частиц
7. Перечень основных параметров счетчика

и головки (2), внутри которой находится зеркало (3), наклоненное под углом φ к оси счетчика. Черенковское излучение частицы фокусируется зеркалом на фотоумножитель, расположенным в сменной трубе (4) и отделенным от газового объема окном (5) из стекла кварцевого оптического. Оптический контакт между этим окном и ФЭУ осуществляется с помощью силиконовой замазки.

Узел крепления ФЭУ (4) должен быть экранирован от магнитного поля.

Должна быть предусмотрена возможность плавного перемещения зеркала (при фиксированном угле наклона) вдоль центральной оси головки и изменение угла наклона. Перемещение делается вручную без требований к отсчету положения зеркала. Регулировка-при вскрытом счетчике.

Для поглощения фонового излучения, связанного со сцинтилляциями рабочего газа и черенковским свечением дельта-электронов, внутренние поверхности трубы (1) и головки (2) имеют черное матовое покрытие и кроме того внутри трубы (1) установлено 6 бленд. Торцовые фланцы счетчика имеют окна, закрытые майларом.

4. Выбор элементов и конструктивных параметров счетчика

Необходимо определить следующие элементы и конструктивные параметры счетчика:

- а) фотоумножитель
- б) зеркало; его форму, размеры, покрытие и угол наклона φ
- в) тип газа
- г) давление газа в счетчике, D (атм)
- д) длину счетчика, L (см).

Для выбора этих элементов необходимо знание зависимости эффективности ϵ от параметров счетчика.

4.1. Зависимость эффективности от параметров счетчика

Эффективность счетчика ϵ зависит следующим образом от параметров счетчика /3,4/:

$$\epsilon = 1 - \exp(-N_e), \quad (1)$$

N_e - среднее число фотоэлектронов, выбитых из фотокатода ФЭУ,

$$N_e = A L \theta^2, \quad (2)$$

θ - угол черенковского излучения,

$$\theta^2 = 2 [D(n_0 - 1) - (1 - \zeta)], \quad (3)$$

где n_0 - показатель преломления газа при давлении $D=1$ атм ($(n_0-1) \ll 1$), β - скорость частицы ($(1-\beta) \ll 1$), A - параметр, характеризующий интегрально свойства ФЭУ, газа и оптики счетчика. Параметр A равен:

$$A = 2\pi\alpha \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \Phi(\lambda) K(\lambda) R(\lambda) \Gamma(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda^2}, \quad (4)$$

где $\alpha = 1/137$, \int - коэффициент светособирания оптической системы счетчика (отношение светового потока, излученного частицей, к световому потоку, падающему на фотокатод фотоумножителя), λ - длина волны, $\Phi(\lambda)$ - квантовый выход фотоумножителя, $K(\lambda)$ - коэффициент пропускания стекла, отделяющего ФЭУ от рабочего объема, $R(\lambda)$ - коэффициент отражения зеркала, $\Gamma(\lambda)$ - прозрачность газа.

Параметр A связан следующим образом с разрешением счетчика по скорости $\delta\beta$ ($\delta\beta = \beta_0 - \beta_1$, β_0 - скорость частиц, при которой эффективность $\varepsilon = 0$, β_1 - скорость частиц, при которой $\varepsilon = e^{-1} \approx 0,63$):

$$\delta\beta = 1/2AL. \quad (5)$$

Для достижения требуемой эффективности счетчика при ограниченной длине счетчика ($L \lesssim 200$ см) необходимо добиться значений $A \approx 150 \text{ см}^{-1} / 3$. Для этого необходимо регистрировать излучение и в ультрафиолетовой области (до $\lambda \approx 180 \text{ нм}$).

4.2. Расчет коэффициента светособирания оптической системы счетчика

Расчет коэффициента светособирания \int был выполнен методом Монте-Карло с помощью специально разработанной программы на ЭВМ СДС 6500. В соответствии с геометрией эксперимента (рис. I) разыгрывались - случайная точка взаимодействия в мишени, угол вылета вторичной частицы, излучение черенковских фотонов вдоль траектории частицы в радиаторе. Далее рассчитывались - отражение фотона от зеркала и пересечение с плоскостью ФЭУ. Эти расчеты были выполнены для зеркал различных форм - сферической и эллиптической. При этом варьировались - угол наклона зеркала и расстояние от центра зеркала до плоскости фотокатода.

Расчеты показали, что для рассмотренных зеркал и $\varphi \approx 47^\circ$ 100% фотонов пересекают плоскость фотокатода ($\int = 1$) в круге диаметром 100 мм. Расстояние от центра зеркала до плоскости фотокатода

равняется 450 мм. Кроме того, было показано, что зеркало эллиптической формы, определенное уравнением

$$y^2 + ax - 2r_0x = 0, \quad (6)$$

где начало координат находится в вершине эллипса, ось x проходит через фокусы эллипса, ось y - перпендикулярно к x //11/, a и r_0 - параметры, обладают несколько лучшими фокусирующими свойствами, чем аналогичное сферическое (диаметр кружка попадания фотонов на плоскости фотокатода на 10% меньше). При этом параметры a и r_0 равны: $a = 0,5625$, $r_0 = 760$ мм.

4.3. Фотоумножитель

Для регистрации излучения в ультрафиолетовой области необходим фотоумножитель с кварцевым окном и фотокатодом, обладающим хорошим квантовым выходом в этой области. Эффективное ($\xi = 1$) светособирание (пункт 3.2) можно осуществить лишь с ФЭУ, имеющим фотокатод диаметром 100 мм.

Эти требования и обусловили выбор ФЭУ - ХР 2041/Q. Этот фотоумножитель, заменивший ранее используемый тип 58 UVP, имеет двухщелочной фотокатод (тип Д), расширенный до ультрафиолетовой области, с размером 110 мм в диаметре, максимальная чувствительность при (400 ± 30) нм составляет ≈ 80 мА/вт. В таблице I приведены чувствительность фотокатода и квантовый выход (в %) для различных длин волн. Эти данные взяты из каталога ФЭУ. [12]

Для отделения ФЭУ от рабочего объема будет использоваться пластина толщиной 10-15 мм из стекла кварцевого оптического марки КУ-1, обладающего наилучшими среди кварцевых стекол характеристиками в ультрафиолетовой области спектра //6/. Коэффициент пропускания этого стекла $K(\lambda)$ с учетом стражения от двух поверхностей приведен в таблице I.

4.4. Зеркало

Выполненные расчеты (пункт 3.2) показали, что можно достичь 100% эффективности собирания света на фотокатоде, если зеркало имеет сферическую форму (диаметр 600 мм, радиус кривизны ≈ 800 мм) или эллиптическую, определенную уравнением (6).

Рассматриваются несколько вариантов изготовления зеркала. В одном из них, основа зеркала изготавливается из поликарбонатного листа толщиной ≈ 2 мм методом вакуумформования. На эту основу будет

производится вакуумное напыление алюминия. Другой вариант — основа из эпоксидной смолы, отражающий слой — алюминизированный майлар. В работе ^{/7/} приведены результаты измерений коэффициентов отражения от зеркал с различным отражающим слоем. Используемая нами в дальнейшем отражательная способность зеркала $R(\lambda)$ (таблица I) с отражающим слоем из алюминизированного майлара с годовым сроком старения отвечает примерно средним характеристикам.

4.5. Газ

Используемый газ должен, с одной стороны, обладать достаточной прозрачностью в ультрафиолетовой части спектра, а с другой, иметь достаточно высокий показатель преломления, чтобы не работать до высоких давлений. Рассмотрение характеристик ряда газов показало, что требуемыми свойствами обладает элегаз SF_6 . Его показатель преломления ^{/4/} при I атм $(n_0 - 1) \approx \xi = 7,26 \times 10^{-4}$, прозрачность, измеренная в ^{/8/}, приведена в табл. I.

4.6. Параметр A

Приведенные в табл. I характеристики элементов счетчика дают возможность вычислить параметр A. Интегрирование по формуле (3) дало значение $A \approx 160 \text{ см}^{-1}$. Эта величина согласуется с экспериментально определенными величинами A для счетчиков подобной конструкции. Так, для счетчика ^{/2/} с ФЭУ 56-UVP $A = 150$, для счетчика ^{/5/} с ФЭУ XP-1023 $A = 169 \pm 22$, для счетчика ^{/3/} величина A колеблется от 82 (для ФЭУ 56-DVP) до 164 (для ФЭУ 31000M). Отметим, что согласно ^{/3,10/} квантовый выход ФЭУ может отличаться для отдельных экземпляров в 2-3 раза от паспортных данных. В дальнейших расчетах мы используем величину $A = 160 \text{ см}^{-1}$.

4.7. Длина счетчика

Согласно ^{/3,4/} длину счетчика можно определить по следующей формуле:

$$L = \frac{Ne}{A} \frac{P^2}{(M_K^2 - M_\Pi^2)}, \quad (7)$$

где P — импульс Π -мезона. Формула (7) получается из (2)-(3) при условии, что давление газа в счетчике установлено так, что K -мезоны с импульсом P не излучают черенковский свет, т.е. $\Theta_K = 0$ или

$$D(n_0 - 1) = 1 - \xi_K \quad (8)$$

При этом

$$\Theta_{\pi}^2 = 2[(1-\beta_K) - (1-\beta_{\pi})] = 2(\beta_{\pi} - \beta_K) = \frac{M_K^2 - M_{\pi}^2}{p^2} \quad (9)$$

В таблице 2 приведены максимальные углы излучения (формула (8)) и минимальные длины радиаторов в зависимости от импульсов. Величина $N_e = 13,7$, что соответствует $1-\epsilon = 10^{-6}$. Таким образом, для регистрации 20 ГэВ π -мезонов необходимо иметь длину ≈ 150 см.

При такой длине, согласно (5), счетчик будет иметь разрешение по скорости

$$\delta\beta = 2,1 \times 10^{-5}$$

4.8. Давление газа

Если фиксирована длина счетчика $L = 150$ см, то давление газа может находиться в пределах между максимальным, определенным порогом излучения для K -мезонов (формула (8))

$$D_{\max} = (1 - \beta_K) / (n_0 - 1) \quad (10)$$

и минимальным, определенным из условия достижения необходимой эффективности регистрации π -мезонов

$$D_{\min} = \frac{1}{(n_0 - 1)} \left[\frac{N_e}{2AL} + (1 - \beta_{\pi}) \right] \quad (11)$$

В таблице 2 приведены величины D_{\min} и D_{\max} в зависимости от импульса π -мезона. Как следует из этой таблицы, интервал рабочих давлений газа в счетчике составляет 0,4–1,7 атм. Так что, согласно [9], данный счетчик не будет считаться сосудом, работающим под давлением. Это приводит к существенному уменьшению требований на конструкцию и правила эксплуатации счетчика.

5. Расчетная кривая эффективности счетчика

Поскольку мы определили необходимые параметры счетчика, то по формулам (1)–(3) можно рассчитать кривую эффективности счетчика. Для $p_{\pi} = 10$ ГэВ/с зависимость неэффективности счетчика от давления будет иметь вид:

$$1 - \epsilon = \exp(-34,8 D + 3,92) \quad (12)$$

Численные значения уравнения (12) представлены в таблице 3.

Можно получить другое представление кривой эффективности, например, в зависимости от импульса частицы. Так, если установить давление в счетчике, равное 0,53 атм, то из (1)–(3) получаем следующую зависимость

$$1 - \epsilon = \exp\left(-18,5 + \frac{470}{p^2}\right) \quad (13)$$

В таблице 4 представлены численные значения кривой (I3), дающие представление о том, как счетчик, настроенный на 10 ГэВ/с ($D=0,53$ атм), будет регистрировать Π -мезоны меньших импульсов.

6. Погрешности, вносимые черенковским счетчиком, в измерение импульсов и углов вылета частиц

Из-за многократного рассеяния частиц в газе, зеркале и майларовских окнах счетчика возникают неопределенности при измерении импульса P , угла вылета частицы θ и боковое смещение координаты Δy :

$$\Delta \theta = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_s}{P} \left(\frac{L_r}{L_{pr}} + \frac{L_z}{L_{pz}} + \frac{L_m}{L_{pm}} \right)^{1/2} \quad (I4)$$

$$\Delta y = \frac{1}{\sqrt{3}} L_c \Delta \theta \quad (I5)$$

$$\frac{\Delta P}{P} = 333 \frac{P}{H L_H} \Delta \theta \quad (I6)$$

Здесь $E_s = 0,021$ ГэВ/с, L_r, L_z, L_m - соответственно толщины (длины) радиатора, зеркала, майлара, то же с индексом P - радиационные длины этих сред; L_c - длина счетчика, $H L_H = 30$ кгс·м - дотклоняющая сила магнита. Подставляя в (I4)-(I6) радиационные длины - $L_{pr} = 44$ м, $L_{pz} \approx 30$ см (основа зеркала пластик или поликарбонат), $L_{pm} = 28,7$ см, толщины сред - $L_r = 150$ см, $L_z = 2$ мм, $L_m = 1$ мм получаем для 10 ГэВ Π -мезонов ($D = 0,5$ атм):
 $\Delta \theta = 2,6 \times 10^{-4}$ радиан, $\Delta y \approx 0,4$ мм, $\Delta P/P \approx 0,3\%$.

Погрешность измерения угла можно сопоставить с неопределенностью в угле, возникающей из-за рассеяния в жидководородной мишени ($L = 30$ см, $L_p = 820$ см), $\Delta \theta \approx 2,8 \times 10^{-4}$.

7. Перечень основных параметров и элементов счетчика

1. Входная апертура - 20 см (по горизонтали), 10 см (по вертикали).
2. Угловой захват - 7° (по горизонтали), 3° (по вертикали).
3. Радиатор - газ SF_6 .
4. Длина радиатора - 150 см.
5. Диапазон рабочих давлений - 0,4 - 1,7 атм.
6. Зеркало - сферической или эллиптической формы с размерами 600×400 мм², радиусом кривизны в центре 760-800 мм.

Угол наклона между осью счетчика и направлением зеркала на ФЭУ - 47° , расстояние от центра зеркала до ФЭУ - 450 мм.

7. ФЭУ - ХР 2041/Q .

8. Стеклянная пластина, отделяющая ФЭУ от газового объема, из стекла кварцевого оптического марки КУ-1 диаметром 170 мм, толщиной 10-15 мм.

9. Неэффективность регистрации Π -мезонов интервала импульсов 10-20 ГэВ/с - 10^{-6} .

10. Интегральное качество ФЭУ и оптики счетчика, параметр $A = 160 \text{ см}^{-1}$.

11. Разрешение по скорости - $2,1 \times 10^{-5}$.

12. Вносимые счетчиком погрешности в измерение угла $2,6 \times 10^{-4}$ радиан, импульса - 0,3%.

Таблица I. Чувствительность $\delta_K(\lambda) [\text{мА/бт}]$, квантовый выход (в %) $\Phi(\lambda)$ - для ФЭУ ХР 2041/Q, пропускная способность с учетом отражения кварцевого стекла оптического типа КУ-1 (в %), отражательная способность зеркала, имеющего отражающую поверхность из алюминизированного майлара, 1 год старения (в %), пропускная способность газа SF_6 (в %) и произведение этих $(\Phi \times K \times R \times \Gamma)$ характеристик Σ (спектральная характеристика счетчика).

$\lambda, \text{нм}$	ФЭУ	кварц	зеркало	газ		
	$\delta_K, \frac{\text{мА}}{\text{бт}}$	$\Phi, \%$	$K, \%$	$R, \%$	$\Gamma, \%$	$\Sigma, \%$
180	1	0,7	78	38	90	0,2
200	3,5	2,4	83	46	100	0,9
250	22	10,9	93	68	100	6,7
300	50	20,7	93	77	"	14,8
350	70	24,8	93	82	"	18,9
400	78	24,2	94	83	"	18,8
450	68	18,8	94	85	"	15,0
500	45	9,0	94	86	"	7,3
550	18	3,3	94	86	"	2,6
650	0,1	0,02	94	86	"	0,02

Таблица 2. Угол черенковского излучения Θ_{π} , длина L , давления D_{min} и D_{max} в зависимости от импульса детектируемой частицы P .

P , ГэВ/с	10	15	20
Θ_{π}	$1,28^{\circ}$	$0,86^{\circ}$	$0,64^{\circ}$
L , см	40	35	150
D_{min} , атм	0,53	0,46	0,43
D_{max} , атм	1,7	0,8	0,43

Таблица 3. Неэффективность счетчика в зависимости от давления

D , атм	0,15	0,2	0,3	0,5	0,8	1
$I-\epsilon$	0,28	$4,9 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-13}$

Таблица 4. Неэффективность счетчика в зависимости от импульса

P , ГэВ/с	10	9	8	7	6	5,5
$I-\epsilon$	10^{-6}	3×10^{-6}	$1,5 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-3}$	5×10^{-2}

М 1:30

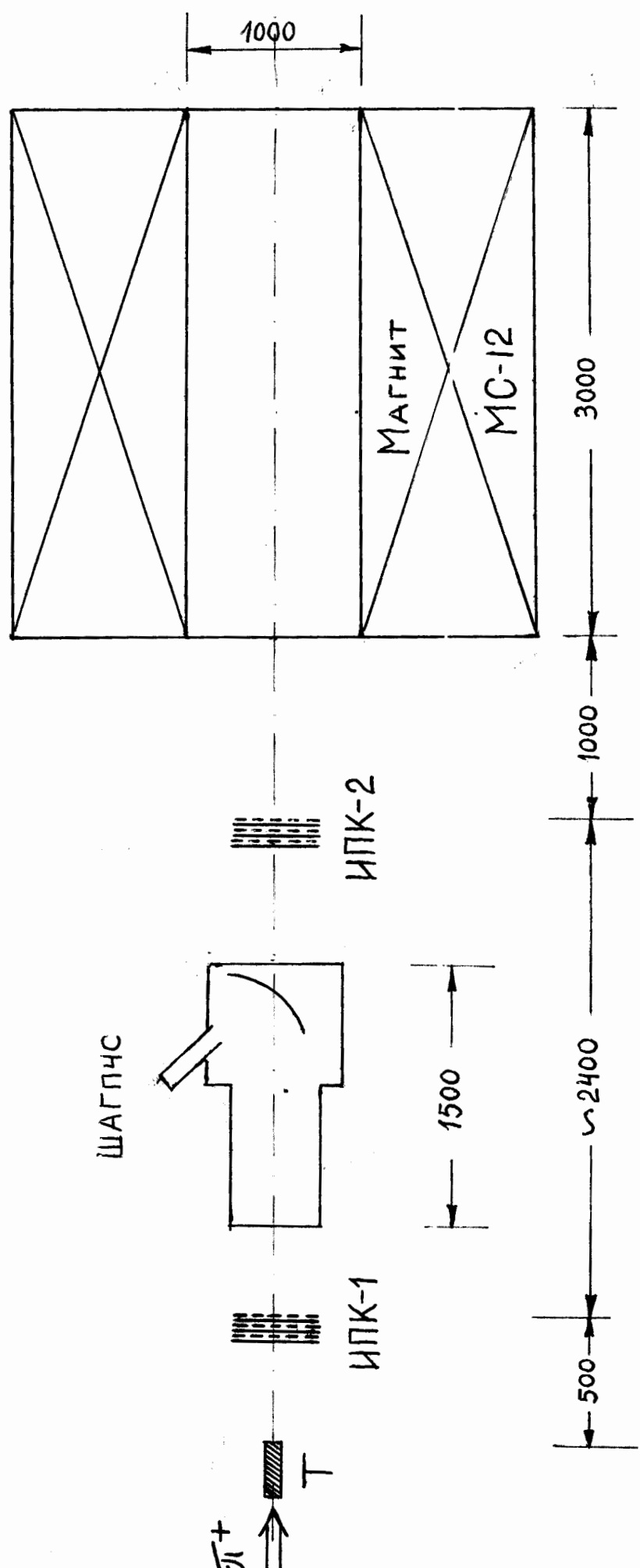


Рис-1 Схематическое изображение части установки (вид сверху)

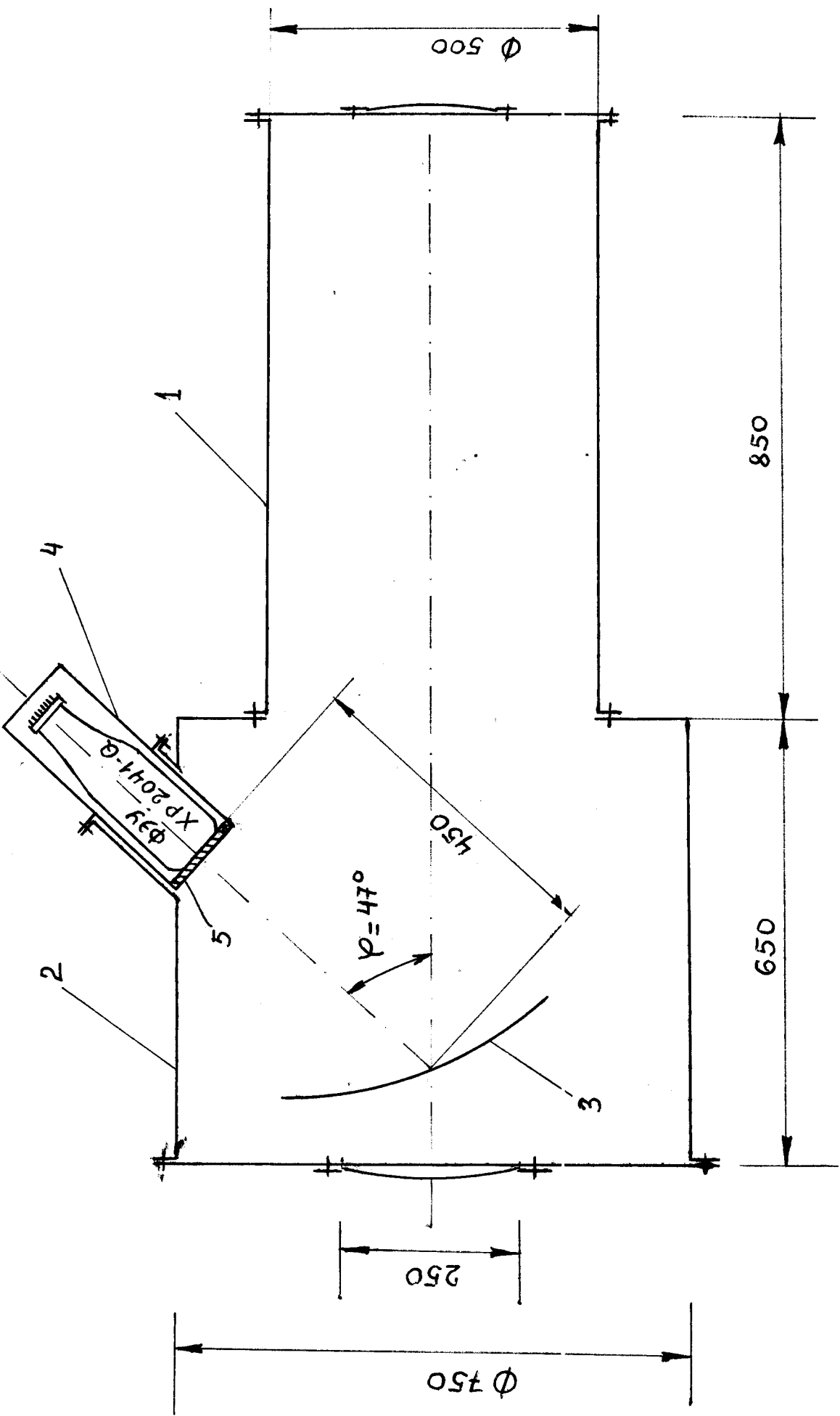


Рис 2 - ШАГПНС

Литература

- I. С.А.Акименко и др. Сообщение ОИЯИ I-8948, 1975
2. Ю.П.Горин и др. ПТЭ, № 3, II7, 1970
3. D.D.Yovanovitch et al. NIM 94, 477, 1971.
4. M.Benot et al. NIM 105, 431, 1972.
5. В.П.Зрелов и др. Сообщение ОИЯИ I3-9318, Дубна, 1975
6. Стекло кварцевое оптическое, ГОСТ I5I30-69
7. G.Grayer et al. MPI-PAE /Exp. E1.40, 1974.
8. E.L.Garwin, A.Roder. NIM 93, 593, 1971.
9. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Изд-во "Металлургия", Москва, 1970.
10. И.И.Анисимова и др. Фотоэлектронные умножители. Москва "Советское радио" 1974
11. Б.Н.Бегунов, Н.П.Заказнов. Теория оптических систем. Москва "Машиностроение", 1973
12. *Quide de l'ingénieur - tubes electro-optiques de photodétecteurs - édition 1977 RTC*