

С 344.13

Л-651

Лихачев М.Ф.

Б5-13-3308

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

БЗ-13-3308

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ
СЧЕТЧИКИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ
K-МЕЗОНОВ В ИНТЕРВАЛЕ ИМПУЛЬСОВ
(5-50) ГЭВ/С.

с. ф. 1848

Результаты исследований
в институте ядерных исследований
25 - 1/4 - 1967

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

г. Дубна, 1967 г.

В настоящее время дифференциальные газовые черенковские счётчики ДС широко применяются в экспериментах по физике высоких энергий.

В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в 1961 г. была разработана конструкция счётчика ДС /1,2/. Его оптическая система состоит из центрированного с осью счётчика сферического зеркала с фокусным расстоянием f и светособирающей системы из параболических зеркал, с помощью которых излучение Вавилова-Черенкова собирается и распределяется на несколько ФЭУ типа ФЭУ-33 или ФЭУ-36. Эта система из параболических зеркал позволяет вывести фотокатоды ФЭУ из пучка частиц, регистрируемых счётчиком. Счётчик ДС 2 успешно использовался в экспериментах по измерению упругого рассеяния Π^+ -мезонов на протонах на угол 180° /3,4/ и исследованию структуры в упругом Π^+ Р рассеянии назад /5/.

Отметим кратко принцип работы ДС.

Угол излучения Вавилова-Черенкова θ_c показатель преломления радматора \bar{n}_c и скорость заряженной частицы β_c связаны известным соотношением:

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\bar{n}_c \beta_c} \quad (1)$$

Для релятивистских частиц соотношение (1) можно записать в виде

$$\theta_c^2 = (\bar{n}_c^2 - 1) - \frac{m^2}{p_c^2} \quad (2)$$

где \bar{m} и \bar{p}_c - масса и импульс частицы, скорость которой

$$\beta_{\bar{c}} = 1 - \frac{1}{2} \frac{\bar{m}^2}{\bar{p}_c^2}, \quad \underline{c} = 1.$$

Излучение Вавилова-Черенкова частицы, движущейся параллельно оси оптической системы, в смысле источника света эквивалентно светящемуся кольцу, расположенному на бесконечности. Если для собирания черенковского света используется объектив с фокусным расстоянием f , то линейный диаметр изображения этого кольца в фокальной плоскости определяется равенством

$$d_{\bar{c}} = 2f \operatorname{tg} \theta_{\bar{c}} \approx 2f \theta_{\bar{c}} \quad (3)$$

Частицы с другой скоростью дадут кольцевое изображение другого диаметра. Помещая в соответствующем месте кольцевую диафрагму, можно пропустить свет нужных частиц и задержать свет остальных. Качество изображения этого кольца определяется аберрациями оптической системы и размытием угла излучения Вавилова-Черенкова в счётчике.

В случае объектива-сферического зеркала с фокусным расстоянием f - за верхнюю оценку размытия изображения вследствие аберраций оптической системы можно взять величину

$$\Delta \theta_{\bar{c}} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{4} \left(\theta_{\bar{c}} + \frac{d_{\bar{c}}}{4f} \right)^3 \quad (4)$$

где Δf - радиальная ширина размытия кольцевого изображения, $d_{\bar{c}}$ - диаметр пучка частиц.

Размытие угла излучения Вавилова-Черенкова относительно угла $\underline{\theta_c}$, на который настроен счётчик определяется, в основном, следующими факторами, роль которых неодинакова:

1. Дисперсией показателя преломления радиатора, в области используемых в счётчике длин волн ($\underline{\lambda_1}, \underline{\lambda_2}$)

$$\underline{\Delta \theta_1} = \frac{1}{2V\underline{\theta_c}} \left(\underline{\theta_c}^2 + \frac{\bar{m}^2}{\bar{P}_c^2} \right) \quad (5)$$

где $\underline{V} = \frac{\frac{1}{2}(\bar{n}_{\lambda_1} + \bar{n}_{\lambda_2}) - 1}{\bar{n}_{\lambda_1} - \bar{n}_{\lambda_2}} = \frac{\bar{n} - 1}{\underline{\Delta \bar{n}}}$ есть

обобщенное число Аббе.

2. Дифракцией и кулоновским рассеянием частицы в радиаторе

$$\underline{\Delta \theta_2} \approx \langle \underline{\theta^2} \rangle^{1/2} = \frac{2l}{\bar{P}_c \text{ МэВ}} \left\{ \frac{\bar{\ell}}{\bar{t}_0} \left(\frac{\rho}{\bar{n}^2 - 1} \right) \left(\underline{\theta_c}^2 + \frac{\bar{m}^2}{\bar{P}_c^2} \right) \right\}^{1/2} \quad (6)$$

где $\bar{\ell}$ - длина радиатора счётчика в см.
 \bar{t}_0 - радиационная длина в г/см²
 ρ - плотность газа в г/см³

3. Распределением частиц в пучке по импульсу, флуктуациями в потерях энергии частицей в передней стенке счётчика и в радиаторе.

$$\underline{\Delta \theta}_3 = \frac{1}{\gamma^2} \cdot \frac{1}{\beta^2 c^2} \cdot \frac{1}{\theta_c^2} (\underline{\Delta \bar{p}}_1^2 + \underline{\Delta \bar{p}}_2^2 + \underline{\Delta \bar{p}}_3^2)^{1/2} \quad (7)$$

где γ - отношение полной энергии частицы к массе покоя.

$\underline{\Delta \bar{p}}_1$ - полная ширина на полувысоте распределения частиц

в пучке по импульсу, $\underline{\Delta \bar{p}}_2 = 4.0,154 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{\bar{T}}{\beta c}$ и

$\underline{\Delta \bar{p}}_3 = \frac{\Delta T_0}{\beta c}$, где ΔT_0 наиболее вероятная потеря энергии в радиаторе.

4. Изменением направления движения частиц из-за кулоновского рассеяния в передней стенке счётчика

$$\underline{\Delta \theta}_4 = 2 \langle \theta^2 \rangle^{1/2} = 2 \cdot \frac{Z^2}{\beta^2 m^2 v} \left(\frac{\bar{t}}{t_0} \right)^{1/2} \quad (8)$$

где \bar{t} и t_0 - толщина передней стенки и радиационная длина, соответственно.

5. Непараллельностью пучка частиц, падающих на ДС,

$$\underline{\Delta \theta}_5 = 2 \underline{\Delta \theta} \quad (9)$$

Таким образом полная угловая величина размытия изображения пучка частиц в фокальной плоскости будет характеризоваться соотношением:

$$\underline{\Delta \theta}_c = \left\{ \sum_{i=0}^5 \underline{\Delta \theta}_i^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

На рис. 1 схематично показано изображение частицы в фокальной плоскости. Ширина кольцевого изображения (заштрихованная зона) условно определена из равенства:

$$\Delta \rho = \frac{\Delta \theta_c'}{f} = \frac{1}{f} \left\{ \sum_{i=0}^{2} \Delta \theta_i^2 \right\}^{1/2} \quad (11)$$

где $\Delta \theta_i$ определены формулами (4), (5) и (6).

Из рис. 1 видно, что если излучение Вавилова-Черенкова пропустить через кольцевую щель, ширина которой равна $\Delta \rho$ (см. (11)) и собирать свет на четыре, симметрично расположенных ФЭУ, то такой счётчик будет самоколлимирующим. Причём, коллимация сильнее для частиц, скорость которых отличается от скорости $\beta_{\bar{c}}$, на которую настроен ДС.

На рис. 2 показаны изображения частиц, скорости которых равны

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \beta_{\bar{c}} + \theta_{\bar{c}} \Delta \theta_c' \quad \text{и} \\ \beta_2 &= \beta_{\bar{c}} - \theta_{\bar{c}} \Delta \theta_c' \end{aligned} \quad (12)$$

и угол между направлением движения этих частиц и осью оптической системы счётчика равен $\theta_{1,2} = \Delta \theta_c'$ (зоны "б" и "с"). Вероятность регистрации частиц, скорость которых равна $\beta_{1,2}$ (см. (12)), будет малой, т.к., по крайней мере, в один из четырех ФЭУ излучение Вавилова-Черенкова практически не попадет (оно будет задержано диафрагмой).

Такого типа дифференциальные газовые черенковские счётчики успешно могут быть использованы в пучках частиц с определенным импульсом для выделения и регистрации релятивистских заряженных частиц с определенной массой, когда скорости частиц с другой массой отличаются на величину

$$\Delta\beta = \theta_c \Delta\theta_c'$$

Из практики применения счётчика Γ ДС2 [4,5] в экспериментах на синхрофазотроне ОИЯИ (рис.2,) а также из вычисления величины возможного фона (см. обзор /6/) следует, что вероятность регистрации частиц, скорость которых отличается на величину $\theta_c = \Delta\theta_c'$ от скорости, на которую настроен ДС равна $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ (см. рис.2). Вклад в эту величину от случайных совпадений равен $0,2 \cdot 10^{-4}$.

В счётчике Γ ДС2 излучение Вавилова-Черенкова собирается на два ФЭУ-36, включенных в совпадения. Поэтому в счётчике, работающем на четыре ФЭУ включенных в совпадения, естественно ожидать, что фон будет $< 5 \cdot 10^{-4}$ и, следовательно, счётчик способен выделять малоинтенсивные компоненты определенного сорта частиц в пучках с определенным импульсом.

Эффективность регистрации частиц счётчиком ДС зависит от среднего числа фотоэлектронов выбиваемых с фотокатода ФЭУ и чувствительности электронной аппаратуры.

В работе / 7,8/ показано, что для лучших из ФЭУ-33 и ФЭУ-36, с индивидуально подобранным режимом питания и распределения напряжения между диодами, среднее число выбиваемых фотоэлектронов с фотокатода ФЭУ равно

$$\bar{N}_e = 50 \theta_c^2$$

(13)

где $\bar{\ell}$ - длина радиатора счётчика

$\bar{\theta}_c$ - угол излучения Вавилова-Черенкова

Для дифференциального счётчика, в котором излучение равномерно распределяется на \bar{n} ФЭУ среднее число фотоэлектронов, выбиваемых с фотокатода ФЭУ, равно

$$\bar{N}_e = \frac{50}{\bar{n}} \bar{\ell} \bar{\theta}_c^2 \quad (14)$$

Эффективность регистрации частиц счётчиком (см /6/), для $\bar{n} = 1$, равна

$$\xi_1 = 1 - e^{-\bar{N}_e} \quad (15)$$

и для $\bar{n} = 4$

$$\xi_4 = (1 - e^{-\bar{N}_e})^4 \quad (16)$$

Если $\xi_4 \geq 0,9$, то $\bar{N}_e = (4,5)$ фотоэлектронов.

В этом случае, из равенства (14) найдем, что

$$\bar{\ell} \bar{\theta}_c^2 \approx 0,3 \pm 0,4 \quad (17)$$

Для равномерного распределения излучения Вавилова-Черенкова на \bar{n} ФЭУ от частиц пучка со скоростью βc необходимо, чтобы диаметр \underline{D}_1 апертурной диафрагмы объектива удовлетворял соотношению

$$\underline{D}_1 \geq d + 2 \bar{\ell} \bar{\theta}_c$$

где \bar{d} - диаметр пучка частиц.

На рис. 3 показана схема конструкции счётчика с апертурной диафрагмой объектива 260 мм. Головная часть счётчиков (часть где расположена диафрагма, светособирающие параболические зеркала и ФЭУ) аналогична 2ДС3 и 2ДС4 (см. работу /2/).

Корпуса счётчиков изготовлены из дуралюминия и рассчитаны на рабочее давление 12,5 кг/см².

Наиболее подходящими газами для счётчиков являются: этан, метан, водород, азот, воздух, неон.

На фиг. 4 показаны фотографии счётчиков 3ДС3 и 3ДС4.

На фиг. 5 показаны светособирающие параболические зеркала для 3-х и 4-х ФЭУ.

Благодарю коллектив научно-экспериментальных мастерских ЛВЭ за изготовление счётчиков и В.С.Ставинского за советы и обсуждения.

23/IV-67г. Журихин

Таблица I

I.	Тип счётчика	ЗДСЗ	ЗДС4	4ДСЗ	4ДС4
2.	Число ФЭУ	3	4	3	4
3.	Разрешающая способность счётчика по скорости Максимальная (радиатор-азот)	$(3,4,5) \cdot 10^{-5}$		$2,2 \cdot 10^{-5}$	
4.	Максимальный оптимальный диаметр пучка частиц см.	8		5	
5.	Максимальная длина счётчика см.	210		360	
6.	Фокусное расстояние объектива см.	150		300	
7.	Диаметр апертурной диафрагмы см.	26		26	
8.	Фокусное расстояние параболических зеркал см.	4,5		4,5	
9.	Расстояние от фокуса параболических зеркал до оси счётчика см.	15		15	
10.	Максимальная ширина щели диафрагмы см.	3,5		1	
11.	Угол, на который можно настроить счётчик				
	максимальн.	65		38	
	минимальн.	(40+49)		35	

Таблица II

	Воздух	Азот	Этан	Водород
$V = \frac{\bar{n}-1}{\Delta \bar{n}}$ ($\lambda_1 = 5500 \text{ \AA}^0$) ($\lambda_2 = 3300 \text{ \AA}^0$)	28	30,5	20,5	21,8
$10^4 \times (\bar{n}^2 - 1)$ ($\lambda = 4000 \text{ \AA}^0$, 0°C , 760 мм.рт.ст.)	2,99	3,05	7,89	1,43
$\frac{\rho}{\bar{n}^2 - 1}$ г/см^3	2,17	2,04	0,86	0,31
$\frac{Z}{A} \cdot \frac{\rho}{\bar{n}^2 - 1}$ г/см^3	-	1,02	0,516	0,31
$10^3 \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \frac{\rho}{\bar{n}^2 - 1}$ см^{-1}	53,5	52,8	18,7	4,95

ρ и t_0 - плотность и радиационная длина.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ.

Рис.1. Изображения частиц в фокальной плоскости. Затрихованное кольцо - цель диафрагмы. Её ширина равна

$$\Delta \rho = \frac{\Delta \theta_c'}{f} = \frac{1}{f} \left\{ \sum_{i=0}^{i=7} \Delta \theta_i^2 \right\}^{1/2}$$

Излучение Вавилова-Черенкова частиц, падающих на счётчик параллельно оси счётчика и имеющих скорость β_c , попадает в цель диафрагмы. Свет от частиц, скорости которых $\beta_c \mp \theta_c = \Delta \theta_c'$, β_c и $\beta_c + \theta_c = \Delta \theta_c'$ и угол между направлением их движения (на входе в радиатор) и осью счётчика равен $\Delta \theta_c'$ пройдет через кольцевую цель частично (затрихованные области \bar{c} , \bar{a} , \bar{b} соответственно).

Рис.2. Эффективность регистрации Π^+ -мезонов счётчиком 1ДС2.

По оси абсцисс отложено давление этилена в счётчике при $\bar{t} = 26^\circ \text{C}$. По оси ординат отложено отношение скоростей счёта $\underline{G} = \frac{N_c}{M}$

Рис.3. Схема конструкции счётчиков ЗДС и 4ДС

Рис.4а фотография счётчика ЗДС3, и Рис.4б - ЗДС4.

Рис.5. Оптические системы для распределения и сбора излучения Вавилова-Черенкова на 3-й и 4-е ФЭУ, используемые в счётчиках ЗДС и 4ДС.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. M. Likhachev, V. Stavinsky, Nucl. Instr. and Meth
20, 261 (1963)
2. М.Ф.Лихачев, И.А.Савин, В.С.Ставинский,
Препринт ОИЯИ Р-2528 (1965).
3. M. F. Likhachev, A. L. Lyubimov, V. S. Stavinsky, and Chzan
Nai-sen. Proc. of an Intern. Conf. on Instrum. for High
Energy Physics, Berkeley 1960.
4. I. A. Savin, A. S. Vovenko, B. N. Gus'kov, M. F. Likhachev,
A. L. Lyubimov, Yu. A. Matulenko, V. S. Stavinsky, Hsu Yun-Chang
Phys. Lett. 17, 68 (1965)
5. А.С.Вовенко, Б.Н.Гуськов, М.Ф.Лихачев, А.Л.Любимов,
Ю.А.Матуленко, И.А.Савин, В.С.Ставинский,
Письма ЖЭТФ т.П, 409 (1965).
6. А.С.Вовенко, Б.Н.Гуськов, Т.Добровольский, М.Ф.Лихачев,
А.Л.Любимов, Ю.А.Матуленко, В.С.Ставинский.
Препринт ОИЯИ РІ-3008, *Дубна*, (1966).
7. А.С.Вовенко, Б.А.Кулаков, М.Ф.Лихачев, Ю.А.Матуленко,
И.А.Савин, В.С.Ставинский. УФН т.81 453 (1963)
8. М.Ф.Лихачев, В.С.Ставинский. Препринт ОИЯИ Р-2423(1965)
9. М.А.Азимов МГУ. Дипломная работа (1962).

23/IV-67. М.Лихачев

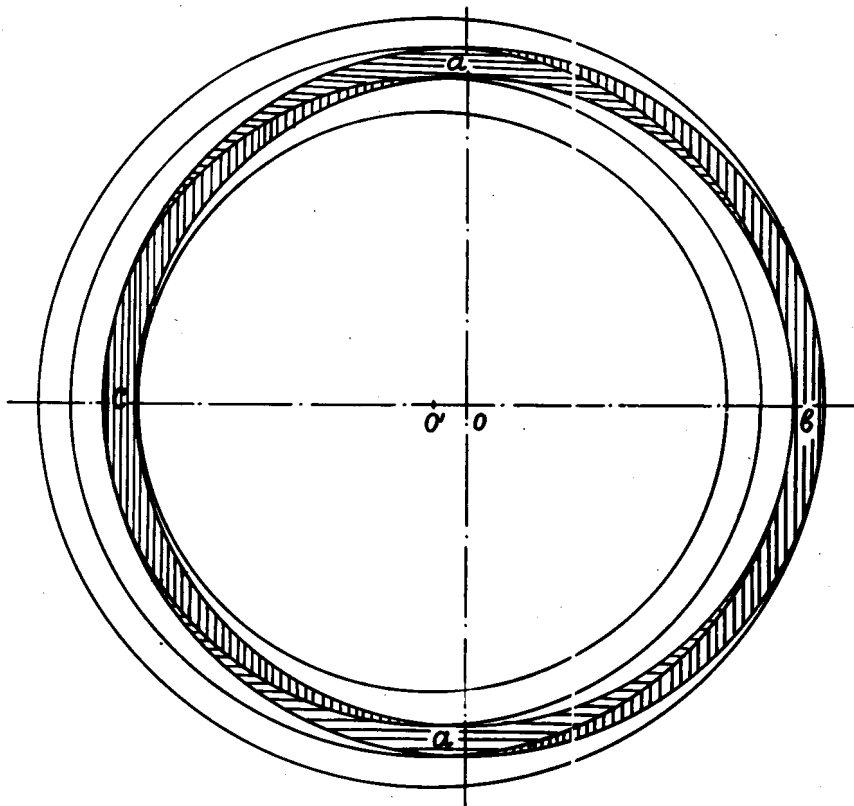
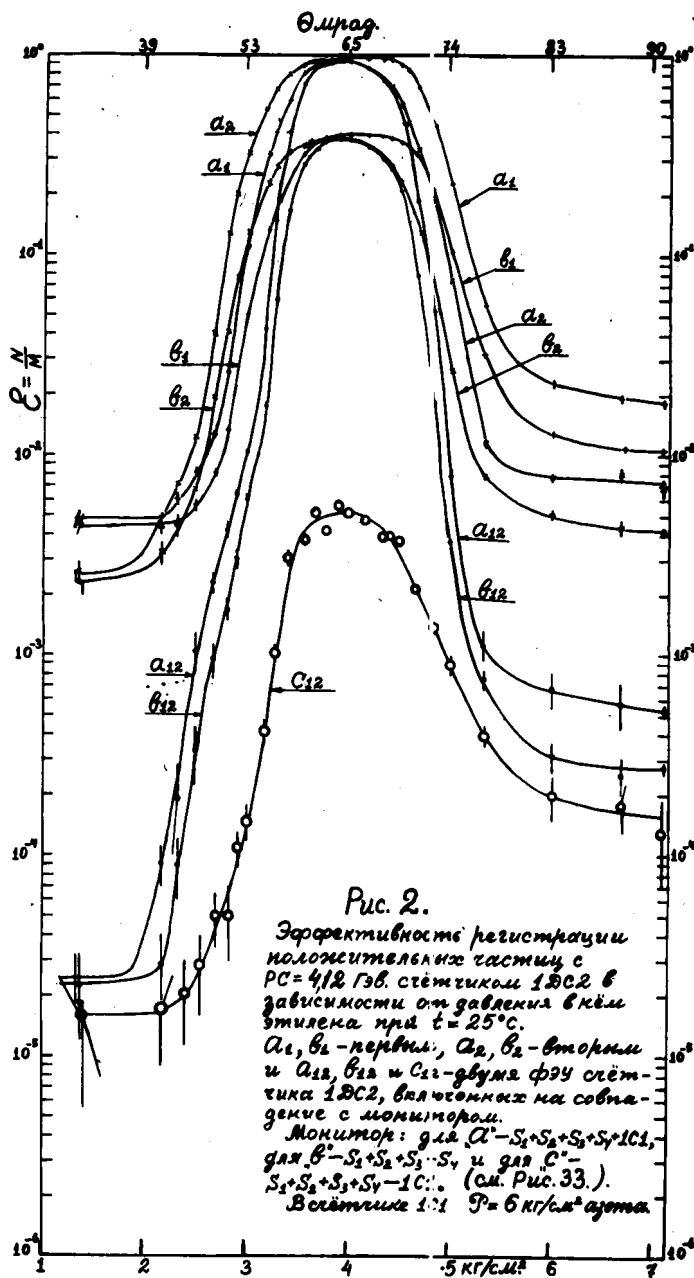


Рис. 1.



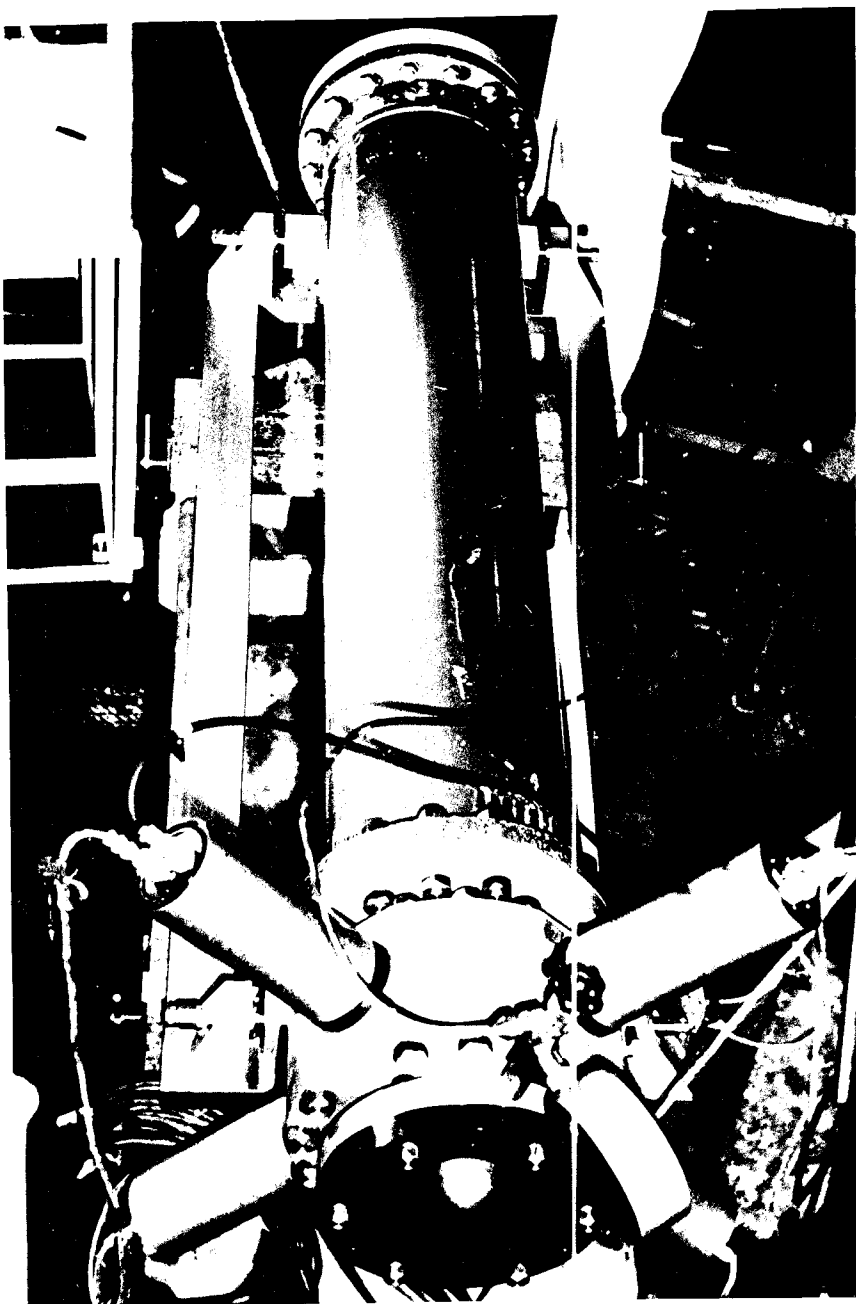


Рис 48.

Счетчик ЗДС4. (в.и сверху).



Рис. 5.