

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

З 15

13-87-835

В.П.Зрелов, Е.С.Кузьмин, В.П.Лупильцев,  
Я.Ружичка

ИСПЫТАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО  
ЧЕРЕНКОВСКОГО МЕТОДА  
ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ  
ПРОТОНОВ 660 МэВ

Направлено в журнал "Приборы и техника  
эксперимента"

1987

## ВВЕДЕНИЕ

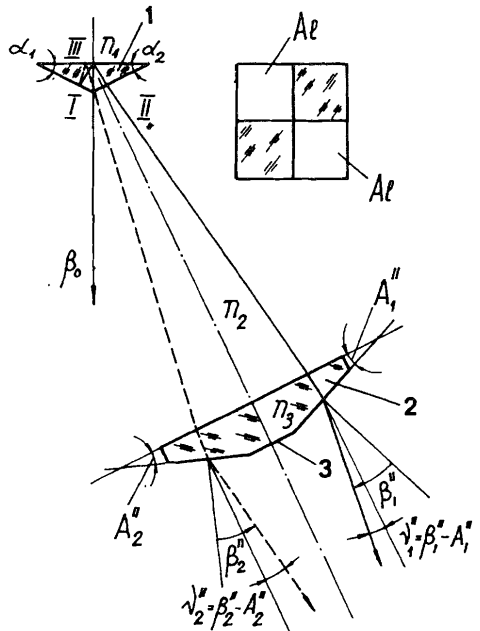
В работе<sup>/1/</sup> был предложен черенковский метод измерения средней энергии частиц в коллимированных пучках от ускорителей, основанный на комбинации так называемого простого<sup>/2/</sup> и ахроматического<sup>/3/</sup> черенковских методов. Такое сочетание позволяет при сохранении простоты и надежности метода<sup>/2/</sup> за счет ахроматизации излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) понизить требования к интенсивности пучка частиц.

### 1. РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В комбинированном черенковском методе в качестве радиатора ИВЧ используется трехгранная призма с абсолютным показателем преломления  $n_1$  и спаренная ахроматическая призма с абсолютным показателем преломления  $n_3$  и преломляющим углом  $A$ . Ход лучей для правой ветви (если смотреть против пучка частиц) оптической системы показан на рис. 1. ИВЧ, испущенное в призме-радиаторе, выпускается через ее грани I и II (каждая из которых наполовину зеркальная), причем через каждую грань выходит излучение как прямое, так и дважды отраженное от входной (III — полностью зеркальной) и противоположной грани.

Углы призмы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в этом методе должны выбираться такими, чтобы угол черенковского излучения  $\theta$  в призме-радиаторе

Рис. 1. Схема комбинированного черенковского устройства и ход лучей: 1 — призма-радиатор (ее вид против пучка), 2 — спаренная ахроматическая призма, 3 — юстировочная грань. Пунктиром показан ход лучей дважды отраженного ИВЧ.



был больше  $\alpha (\theta > \alpha)$ . Только в этом случае двойные ахроматические призмы будут работать правильно.

При условии, что входные грани ахроматической призмы параллельны выходной грани призмы-радиатора, система уравнений для определения преломляющего угла  $A$  призмы имеет вид

$$\left. \begin{aligned} n_1 \sin(\theta - \alpha) &= n_3 \sin \gamma_1, \\ n_3 \sin(A - \gamma_1) &= n_2 \sin(A + \nu), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $n_2$  — показатель преломления воздуха, а  $\nu$  — угол выхода ИВЧ из призмы, отсчитываемый от нормали к ее передней грани.

С учетом ахроматизации ИВЧ после призмы  $\Delta \nu_{\lambda_1 \lambda_2} = 0$  можно найти углы  $A, \alpha$ , чтобы излучение вышло из ахроматической призмы под заданным углом  $\nu$ . В этом случае надо решить уравнение (изменяя  $x$  в диапазоне  $\arcsin(n_2/n_1) > x > 0$ ):

$$(L \sin x + \Delta \theta \cos x) \left( \frac{n_3}{n_2} - \cos R \right) - K \sin R \sqrt{\frac{n_3^2}{n_1^2} - \sin^2 x} = 0, \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\Delta n_1}{n_1} - \frac{\Delta n_3}{n_3}; \quad K = \frac{\Delta n_3}{n_3} - \frac{\Delta n_2}{n_2}; \quad x = \theta - \alpha; \\ \gamma_1 &= \arcsin \frac{n_1}{n_3} \sin x; \quad R = \nu + \gamma_1; \quad Y = \arctg \frac{\sin R}{\frac{n_3}{n_2} - \cos R}; \\ A &= Y + \gamma_1; \quad \cos \theta = \frac{1}{n_1 \beta}; \quad \Delta \theta = \frac{\Delta n_1}{n_1^2 \beta \sin \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Однако здесь мы использовали более простое решение <sup>/1/</sup>, которое дает условие ахроматизации под произвольным углом  $\nu$ :

$$\begin{aligned} \cos A &= -\xi \sin \gamma_1 + \cos \gamma_1 \sqrt{1 - \xi^2}; \\ \xi &= \left(1 - \frac{K}{\Delta \gamma_1}\right)^{-1/2}; \quad \sin \gamma_1 = \frac{n_1}{n_3} P; \quad P = \sin(\theta - \alpha); \\ \Delta \gamma_1 &= n_1 \frac{LP + \Delta \theta \sqrt{1 - P^2}}{\sqrt{n_3^2 - n_1^2 P^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

а  $K, L, \Delta \theta$  те же, что и в формулах (3).

Угол выхода излучения из призмы

$$\nu = A - \arcsin \frac{n_3}{n_2} \xi. \quad (5)$$

Заметим, что формулы (4) и (5) (так же, как и уравнения (2)) дают правильный результат, если они при заданных  $\Delta n_1, \Delta n_2$  и  $\Delta n_3$  используются дважды, то есть сначала вычисляется угол  $A_1$  при подстановке во все соотношения величин  $n_1, n_2$  и  $n_3$  для крайней длины волны  $\lambda_1$  выбранного диапазона ахроматизации, а затем —  $A_2$  для  $\lambda_2$ . Средний угол  $A = (A_1 + A_2) / 2$  точно соответствует условию  $\Delta \nu_{\lambda_1 \lambda_2} = 0$ .

Материалом для призмы-радиатора был выбран плавленный кварц ввиду его хорошей радиационной стойкости, а ахроматическая призма была изготовлена из тяжелого флинта марки ТФ-5.

Во всех измерениях использовалась призма-радиатор с углами  $\alpha_1 = 26^\circ 00' 38''$  и  $\alpha_2 = 26^\circ 00' 04'' \pm 5''$ , а спаренные ахроматические призмы — в двух вариантах, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ призмы	Угол $A_1$	Угол $A_2$	Погрешность
1	20° 49' 15''	20° 48' 45''	± 10''
2	20° 49' 41''	20° 49' 31''	± 10''
3*	20° 18' 07''	20° 18' 31''	± 10''
4*	20° 18' 37''	20° 18' 14''	± 10''

\* Этот вариант компенсатора наиболее близок к оптимальному  $A = 20^\circ 07' 24''$  для энергии 660,0 МэВ.

## 2. УСТРОЙСТВО ПРИБОРА

Принципиально при использовании комбинированного черенковского способа измерения энергии достаточно одного плеча, то есть одной спаренной ахроматической призмы, но для контроля и получения более надежных результатов устройство было выполнено двухплечным (I и II), см. рис. 2.

Оптические элементы устройства: призма-радиатор (3), спаренные ахроматические призмы (4) и плоские зеркала (5) — размещались на отдельных юстировочных столиках, позволяющих производить наклон их в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При прохождении пучка протонов через радиатор (3) возникало ИВЧ, которое после ахроматизации отклонялось зеркалами (5) в сторону от пучка и регистрировалось фотоаппаратами "Зенит-3М" с объективами "Гелиос-40", настроенными на бесконечность.

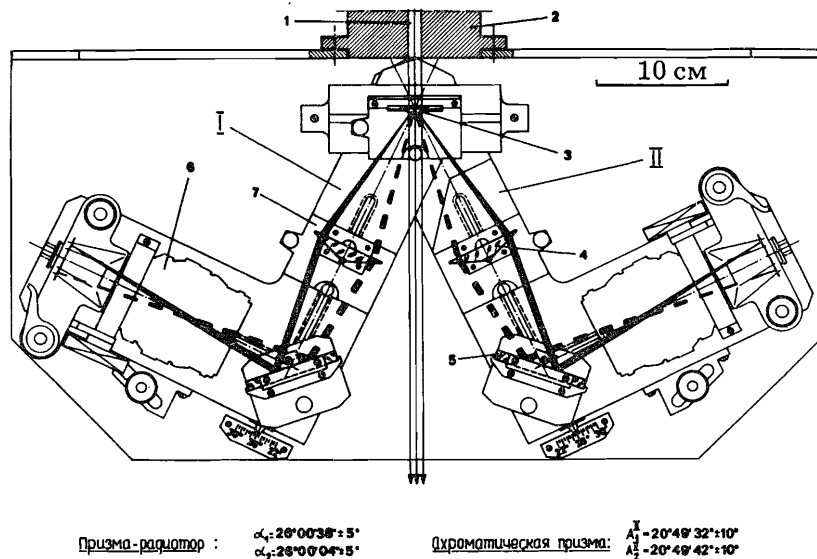


Рис. 2. Устройство прибора: 1 — пучок протонов, 2 — коллиматор, 3 — призма-радиатор, 4 — спаренная ахроматическая призма, 5 — плоские зеркала, 6 — фотоаппараты "Зенит-3М" с объективами "Гелиос-40", 7 — юстировочные столики.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА

Испытания прибора производились на выведенном пучке протонов от реконструированного фазотрона ОИЯИ. Непосредственно перед прибором пучок протонов формировался коллиматором диаметром 10 мм и длиной 700 мм. Изображение ИВЧ фиксировалось на киноплёнке типа КН-3 и имело вид, показанный на рис. 3. Результаты фотометрирования изображений показаны на рис. 4. Ширина пиков определяется остаточной дисперсией прибора, многократным рассеянием протонов и их замедлением в призме-радиаторе, а также угловым энергетическим

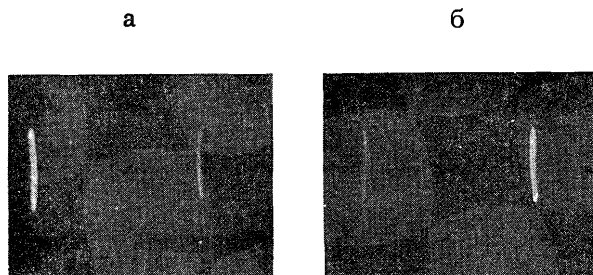
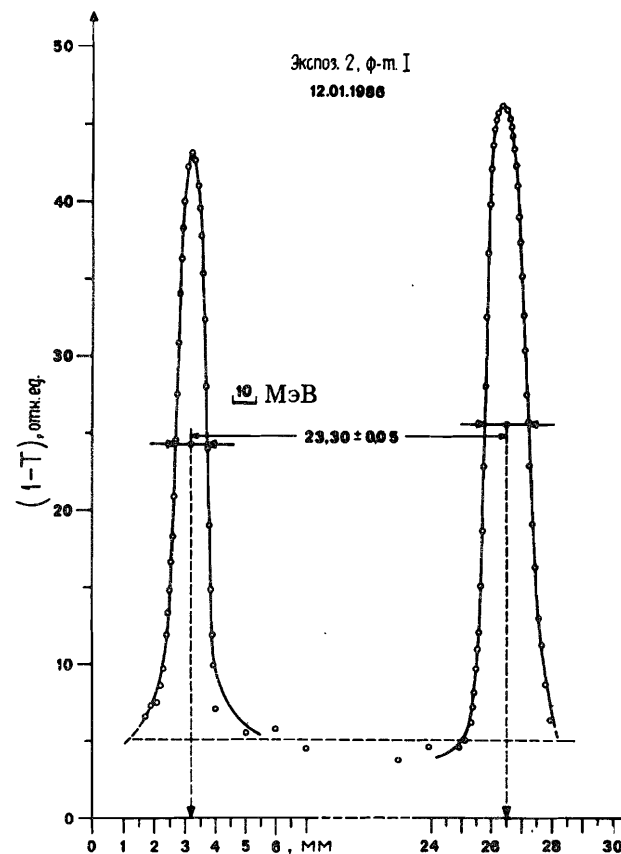


Рис. 3. Фотографии ИВЧ, зарегистрированного в устройстве, показанном на рис. 4 в плечах I и II. а — плечо I (лево, если смотреть против пучка протонов), б — плечо II.

Рис. 4. Фотометрическая кривая черенковских изображений (прямого и дважды отраженного).



разбросом пучка. Средняя энергия определялась по расстоянию между центрами ширины пиков на полувысоте ( $l$ ). Расчетные значения расстояний между пиками определялись для каждой энергии с учетом спектра ИВЧ, остаточной дисперсии, а также спектральных зависимостей пропускания объектива и чувствительности фотоматериала. Для вычисления средней энергии по экспериментальным значениям ( $l$ ) были использованы различные (как аналитические, так и вычислительные) алгоритмы, которые дали значения энергии, совпадающие в пределах погрешностей прибора. Формулы для вычисления скорости частиц по экспериментальным величинам  $l$  приведены в приложении. В расчетах использовались значения показателей преломления для кварца и стекла ТФ-5, измеренные с помощью гониометра ГС-5 на контрольных призмах. Точность измерения показателей преломления  $n$  составила  $\Delta n = \pm 4 \cdot 10^{-5}$ .

Зависимость показателей преломления аппроксимировалась формулой Коши и имела следующий вид для плавленого кварца:

$$n(\lambda)_{\text{SiO}_2} = 1,44797 + \lambda^{-2} 0,3846 \cdot 10^{-2} - \lambda^{-4} 0,5909 \cdot 10^{-4},$$

и стекла ТФ-5:

$$n(\lambda)_{\text{ТФ-5}} = 1,720653 + \lambda^{-2} 0,108727 \cdot 10^{-1} + \lambda^{-4} 0,61322 \cdot 10^{-3},$$

где  $\lambda$  - в мкм.

Всего на протяжении полутора лет было проведено 3 серии измерений средней энергии выведенного пучка протонов фазотрона ОИЯИ с различными вариантами углов компенсации дисперсии.

Результаты обработки этих измерений приведены в табл. 2, где номер плеча указывает, в какое положение относительно радиатора была установлена призма (см. табл. 1), а  $\ell$  — измеренное на пленке расстояние между пиками.

Таблица 2

Дата	№ плеча	№ призмы	Расстояние $\ell$ (мм)	E (МэВ)	$\bar{E}$ (МэВ)
12.01.1986 г.	1	1	23,20	657,4	657,9
	2	2	23,27	658,4	
29.06.1986 г.	1	1	24,57	648,1	648,1
12.06.1987 г.	1	3	22,22	654,1	654,5
	2	4	22,31	654,8	

Поскольку расчет энергии протонов по формулам (1) и (2) приложения соответствует энергии в центре призмы-радиатора, то для получения энергии на входе в радиатор нужно добавить сброс энергии на половине ее эффективной толщины (которая составляет  $\ell_{эф}/2 = 1,85$  мм). С учетом тормозных потерь протонов 660 МэВ в плавленом кварце согласно <sup>4/</sup> ( $\Delta E/\Delta x = 5,54$  МэВ/см) сброс составил  $\Delta E = 1,02$  МэВ. Для получения средней энергии протонов на выходе из вакуумной камеры фазотрона необходимо учесть замедление протонов в воздухе ( $\sim 22$  метра или  $2,84$  г/см<sup>2</sup>), которое составляло 6,12 МэВ. С учетом этих поправок, например в последнем сеансе работы (12.06.1987 г.), средняя энергия в месте проведения измерений составила 655,5 МэВ, а на выходе из камеры ускорителя (без учета сброса энергии в фольгах вакуумной камеры, расположенной в зазоре отклоняющего магнита СП-37) ( $661,5 \pm 0,6$ ) МэВ. В работе <sup>5/</sup> методом измерения кривой Брэгга получено близкое значение.

Как видно из табл. 2, возможны изменения средней энергии протонов в выведенном пучке до 10 МэВ.

#### 4. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Многие факторы влияют на ошибку измерения средней энергии протонов этим методом. Основные из них приведены в табл. 3.

Таблица 3

№№	Фактор	Величина	$\Delta E$ , МэВ
1	$\Delta a$	$\pm 5''$	$\pm 0,0475$
2	$\Delta A$	$\pm 10''$	$\pm 0,027$
3	$\Delta n_1$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,1095$
4	$\Delta n_3$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0,024$
5	$\Delta \ell$	$\pm 0,03$	$\pm 0,207$
6	Ошибка калибровки, мм	$\pm 0,02$	$\pm 0,138$
7	Остаточная дисперсия	—	$\pm 0,5$

Среднеквадратичная ошибка  $\overline{\Delta E} = \pm 0,60$  МэВ.

#### 5. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ УСТРОЙСТВА ПО ЭНЕРГИЯМ

Экспериментальная полная ширина пика ИВЧ, измеренная на полувысоте, получилась равной  $\Delta E_{пикс} = 13,8$  МэВ. В эту величину дает вклад как собственное (приборное) разрешение, так и уширение, вносимое энергетическим и угловым размытием протонов.

Собственная разрешающая способность складывается из факторов, приведенных в табл. 4.

Таблица 4

№№	Фактор	Величина	Уширение, МэВ
1	Множественное рассеяние	$\pm 6,93'$	$\pm 3,96$
2	Потери протонов в призме-радиаторе		$\pm 1,02$
3	Остаточная дисперсия		$\pm 0,50$

$\Sigma \Delta E = \pm 4,1$  МэВ.

Оставшаяся часть ширины пика, обусловленная разбросом энергии в пучке и его угловой расходимостью ( $\Delta a$ ), составляет  $\Delta E_{E,a} = \pm 5,6$  МэВ. Оценить энергетический разброс протонов не представляется возможным ввиду неизвестной угловой расходимости пучка.

В заключение авторы благодарят профессора С.П.Денисова за содействие в изготовлении оптических элементов устройства в опытном производстве ИФВЭ (Протвино), Н.Н.Лебедева за помощь в работе на ускорителе, Р.В.Столупину за кропотливый труд по фотометрированию черенковских изображений и помощь в подготовке рукописи.

Для вычисления скорости частицы  $\beta_0$  по расстоянию между пиками  $\ell$  можно воспользоваться формулами (для плеча 1)

$$\beta_0^2 = \frac{(2k' + \text{tg}^2 2\alpha_1) + \sqrt{\text{tg}^2 2\alpha_1 [4k'(1-k') + \text{tg}^2 2\alpha_1]}}{2k'^2 n_1^2}, \quad (1)$$

где

$$k' = \frac{k}{\text{Cos} 2\alpha_1}; \quad k = \text{Cos}^2 \alpha_1 - \frac{n_3^2}{n_1^2} \text{Sin}^2 \gamma_1'; \quad \text{Sin}^2 \gamma_1' = 1 - (P + \sqrt{P^2 - M})^2;$$

$$P = \frac{n_2}{n_3} \text{Sin} \beta_1 \text{Sin} A_1^I; \quad M = \frac{n_2^2}{n_3^2} \text{Sin}^2 \beta_1 - \text{Cos}^2 A_1^I; \quad \beta_1 = \frac{\ell m_1 + \Delta\beta}{2} + A; \quad A = \frac{A_1^I + A_2^I}{2}; \quad (2)$$

$$\Delta\beta = \Delta\beta_{\Delta\alpha} + \Delta\beta_{\Delta A},$$

и приняты следующие обозначения:  $n_1, n_2, n_3$  — соответственно коэффициенты преломления радиатора, воздуха и компенсатора,  $\alpha$  и  $A$  — углы у основания призмы-радиатора и компенсатора,  $\beta_1$  — угол выхода ИВЧ из ахроматической призмы. В первом приближении полагаем  $\Delta\beta = 0$ , а в последующих поправка может быть вычислена следующим образом:

$$\frac{\Delta\beta_{\Delta\alpha}}{\Delta\alpha} \text{Cos} \beta_1 = \frac{n_1^2}{2n_2 n_3} \text{Sin} A_1^I \text{Sin} 2(\theta - \alpha_1) \left[ 1 - \frac{n_1^2}{n_3^2} \text{Sin}^2(\theta - \alpha_1) \right]^{-1/2} + \frac{n_1}{n_2} \text{Cos} A_1^I \text{Cos}(\theta - \alpha_1),$$

$$\frac{\Delta\beta_{\Delta A}}{\Delta A} \text{Cos} \beta_1 = \frac{n_3}{n_2} \text{Cos} A_1^I \left[ 1 - \frac{n_1^2}{n_3^2} \text{Sin}^2(\theta - \alpha_1) \right]^{1/2} + \frac{n_1}{n_2} \text{Sin} A_1^I \text{Sin}(\theta - \alpha_1), \quad (2)$$

$$\Delta A = A_1^I - A_2^I; \quad \Delta\alpha = 2(\alpha_1 - \alpha_2).$$

Аналогичные (1) и (2) формулы для плеча II получаются простой заменой в них:  $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2$ ;  $\gamma_1' \rightarrow \gamma_2''$ ;  $\beta_1 \rightarrow \beta_2$ ;  $A_1^I \rightarrow A_1^{II}$ ;  $A_2^I \rightarrow A_2^{II}$ ;  $\ell_1 \rightarrow \ell_2$ ;  $m_1 \rightarrow m_2$ , если угол ахроматической призмы, через который проходит прямой луч ИВЧ, обозначается как  $A_1^{II}$ , а дважды отраженный проходит через  $A_2^{II}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zrelov V.P. — Nucl. Instr. and Meth., 1979, v.166, 207.
2. Zrelov V.P. — Nucl. Instr. and Meth., 1974, v.115, 457.
3. Zrelov V.P., Pavlovic P., Shulek P. — Nucl. Instr. and Meth., 1973, v.107, p.279.
4. Janni T.F. — Atomic Data and Nucl. Data Tables, 1982, v.27, part I, p.311.
5. Абазов В.М. и др. Сообщение ОИЯИ 9-87-322, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 ноября 1987 года.

Зрелов В.П. и др.

13-87-835

Испытание комбинированного черенковского метода измерения средней энергии протонов 660 МэВ

Приводятся результаты проверки комбинированного черенковского устройства для измерения средней энергии в пучке протонов 660 МэВ от реконструированного фазотрона ОИЯИ. Устройство работает при более низких потоках протонов (примерно на два порядка), чем это требуется для так называемого простого черенковского метода. Приводятся основные формулы расчетов ахроматической призмы и обработки результатов. Достигнутая точность составила  $\Delta E = \pm 0,6$  МэВ. Даются результаты трех измерений, выполненные за 1,5 года с момента пуска ускорителя.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Zrelov V.P. et al.

13-87-835

Test of a Combined Cherenkov Method for Measurement of the Mean Energy of 660 MeV Protons

The results obtained in test of a combined Cherenkov device for measurement of the mean energy in the 660 MeV proton beam of the converted phasotron in JINR are presented. The device operates with lower (approx. by two orders) proton fluxes than those necessary for the so-called simple Cherenkov method. The main formulae for calculation of the achromatic prism and for the analysis of the results are given. An accuracy  $\Delta E = \pm 0.6$  MeV has been achieved. The results of three measurements performed during 1.5 years since the accelerator putting into operation are given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987