

Абдурахимов А. У. и др.

Б 2-1-85-94

СЗЧЧ. 1и



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2808/85

Б 2-1-85-94

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 85

62-1-85-94

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Лаборатория вычислительной техники и автоматизации

А.У.Абдурахимов, В.Д.Аксиненко, Г.Л.Барденга,  
Н.С.Глаголева, Е.А.Дементьев, В.Г.Иванов,  
Н.И.Каминский, Э.В.Козубский, А.А.Кузнецов,  
Б.А.Кулаков, Е.С.Кузнецова, А.И.Малахов,  
А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин, Н.Н.Нургожин\*, И.С.Саитов

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТРИМЕРНОГО  
СПЕКТРОМЕТРА

\* ИФВЭ АН Каз.ССР

Дубна, 1984 г.

Рукопись поступила  
издательский отдел  
12.02.1985.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Дубна

## 1. ВВЕДЕНИЕ.

В ОИЯИ длительное время эксплуатировался магнитный спектрометр со стримерной камерой СКМ-200<sup>/1/</sup>, позволивший получить ряд интересных физических результатов<sup>/2/</sup>. В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по импульсному разрешению этого спектрометра и обсуждаются пути улучшения разрешения стримерных спектрометров.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЗРЕШЕНИЕ СТРИМЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА.

Импульсное разрешение стримерного магнитного спектрометра для однозарядных частиц, если глубинный угол мал и точки отсчета равномерно распределены на следе и число точек пропорционально его длине<sup>\*</sup>, определяется следующим выражением<sup>/3/</sup>:

$$\Delta R/R (\%) = \sqrt{(A/\beta)^2 + (B \cdot P)^2}, \quad (I)$$

где  $A = 577/(H \sqrt{\ell X_0})$ ,  $B = 1,2 \cdot 10^2 \varepsilon_0 / (H \ell^{5/2})$ ,  $H$  - магнитное поле в Т,  $\ell$  - длина следа в см,  $P$  - импульс частицы в ГэВ/с,

$\varepsilon_0$  - пространственная ошибка в мкм,  $\beta = v/c$  - скорость частицы в единицах скорости света,  $X_0$  - радиационная длина в газе в см. Для частиц с зарядом  $Z \neq 1$   $A = A \cdot Z$ ,  $B = B/Z$ .

<sup>\*</sup> Если число отсчетов на следе не зависит от длины следа, то  $\Delta R/R (\%) = \sqrt{2,6 \cdot 10^5 / (H^2 \cdot \ell \cdot X_0 \beta^2) + 3,6 \cdot P^2 \varepsilon_0^2 / (H^2 \cdot \ell^4)}$  при тех же значениях величин. Результаты расчетов по обеим формулам одинаковы при  $\ell \cong 40$  см<sup>/4/</sup>.

Первый член в (I) определяется многократным кулоновским рассеянием частиц в газе и вносит основной вклад в ошибку импульса при измерении длинных следов относительно медленных частиц. Например, при длине следа  $l \sim 1$  м и голе  $H \sim 1$  Т этот член дает основной вклад в ошибку при  $P < 1$  ГэВ/с.

С точки зрения улучшения импульсного разрешения стримерного спектрометра важен выбор рода газа с возможно большей радиационной длиной  $X_0$  и меньшей величиной коэффициента диффузии  $D$ , влияющего на ширину следа частицы в камере. Величины  $X_0$ <sup>/5/</sup> и  $D$ <sup>/6/</sup> для некоторых газов в сравнении с жидкими водородом и пропаном даны в табл. I.

Таблица I

	Неон	Гелий	Водород	Азот	Водород жидкий	Пропан жидкий
$X_0, \text{см}$	34600	654000	752000	32800	1000	100
$D, \text{см}^2/\text{с}$	$2,2 \cdot 10^3$	330	$\sim 500$	$\sim 500$	-	-

Из этой таблицы видно, что наилучшее сочетание значений  $X_0$  и  $D$  имеют водород или гелий. Однако, работа камеры с этими газами затруднена, т.к. водород взрывоопасен и, кроме того, требует повышенного значения электрического поля, а треки в гелии имеют слабое свечение. Поэтому наиболее употребительным наполнением является неон или газовая смесь гелия с неоном, с которой камера нормально работает, даже если примесь неона составляет не более нескольких процентов<sup>/1/</sup>. Особого внимания заслуживает азот с примесями, в котором яркость треков может на два порядка превышать обычную<sup>/7/</sup>, а значение  $D$  сравнительно невелико.

С ростом величины импульса частиц основную роль в импульсном разрешении начинает играть второй член в подкоренном выражении (I), т.е. пространственная ошибка, которая зависит от точности локализации стримеров на следе частицы. Пространственная ошибка зависит от геометрических размеров стримеров, процесса диффузии электронов за время задержки импульса электрического поля и погрешностей, вносимых при регистрации событий (разрешение оптической системы и фотоматериалов) и последующей обработки (усадка фотопленки, погрешности измерительных устройств). Если все эти погрешности отнести к погрешностям регистрации и обработки  $\Delta_{po}$ , которые обычно известны, то ширина следа, восстановленного в объеме камеры будет равна:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_{po}^2} \quad (2)$$

где  $\Delta_c$  - погрешность, обусловленная характеристиками стримерного следа;  $\Delta_c = \sqrt{d^2 + (2r_d)^2}$ ,  $d = (4,32 \cdot 10^{-7} N / \alpha E)^{1/3}$  - диаметр стримера<sup>/8,9/</sup>,  $r_d = \sqrt{4DE}$  - радиус диффузии.

Для камеры с неоном в обычных условиях (униполярный импульс длительностью  $2 \cdot 10^{-8}$  с, атмосферное давление газа)  $d = 2r_d \cong 1$  мм, т.е.  $\Delta_c \cong \sqrt{2}d$ . Для гелия и смеси гелия с неоном,  $r_d$  значительно меньше и  $\Delta_c \cong d$ .

Согласно<sup>/10/</sup>  $\Delta_{po}$  можно записать в виде:

$$\Delta_{po} = \sqrt{\left[ \frac{\Delta X / 2}{n_r (M+1)} \right]^2 + [(M+1) \cdot \lambda \cdot n_r]^2 + \left[ \frac{M^2 \delta / 2}{(M+1) \cdot n_r} \right]^2 + \sum \frac{M^2}{R_i^2}} \quad (3)$$

где  $\Delta X$  - глубина камеры,  $n_r$  - численное значение диафрагмы объектива,  $M$  - коэффициент уменьшения снимка,  $\lambda = 6 \cdot 10^{-4}$  мм - длина волны светового излучения стримера,  $R_i$  - разрешение при 50% модуляции каждого оптического элемента (оптика, фотослой и т.д.),  $\delta$  - величина биения пленки в फिल्मовом канале. При этом величиной  $\sim 0,1 \cdot \Delta$  оценивается<sup>/10/</sup> точность определения координат оси следа. Она может служить мерой вклада размеров стримера и погрешностей фоторегистрации в величину  $\epsilon_0$ . Вклад измерительной ошибки  $\delta$  изм. в  $\epsilon_0$  оценивается как  $\delta$  изм.  $\cdot M^{1/2}$ . Величины  $X_0$  и  $\Delta_c$  зависят от давления газа<sup>/5,12/</sup>.  $\Delta P/P$  имеет минимальное значение при некотором оптимальном давлении газа  $\alpha_{opt}$ , когда оба члена под корнем в (1) равны. Для камеры, наполненной неоном,  $\alpha_{opt}$  в единицах атмосферного давления равно:

$$\alpha_{opt} = 38,7 \cdot P \cdot \epsilon_0 \cdot \beta \cdot \ell^2 \quad (4)$$

и выигрыш в разрешении за счет регулируемого давления составит:

$$\frac{\Delta P/P(\alpha = 1)}{\Delta P/P(\alpha = \alpha_{opt})} = \sqrt{(1 + \alpha_{opt}^2) / (2 \alpha_{opt})} \quad (5)$$

### 3. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТРИМЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА СКМ-200.

Спектрометр СКМ-200 использовался для изучения ядро-ядерных столкновений в пучках релятивистских ядер синхрофазотрона ОИЯИ. Стримерная камера СКМ-200 имела рабочий объем, заполненный неоном при нормальном давлении, состоящий из двух промежутков высотой по 0,3 м и шириной и длиной 0,9 и 1,9 соответственно. Камера распо-

лагалась в зазоре магнита с магнитным полем напряженностью 0,8 Т (рис.1). Высоковольтный импульс, подаваемый на камеру имел длительность 12 нс на полувисоте с временем нарастания и спада  $\sim 5$  и  $\sim 7$  нс соответственно.



Рис.1. Общий вид установки SKM-200.

На рис.2 приведены зависимости импульсного разрешения от импульса для  $\Pi$ -мезонов, протонов, дейтонов и альфа-частиц, вычисленные по формуле (1) для 2-х значений длины следа  $\ell = 0,5$  и 1 м и  $\xi_0 = 600$  мкм. На этом же рисунке приведены экспериментальные данные по импульсному разрешению для  $\Pi^-$ -мезонов, образующихся во взаимодействиях пучка ядер углерода с энергией 4,5 ГэВ/нуклон с медной мишенью, расположенной внутри камеры.

Для оценки разрешения были отобраны  $\Pi^-$ -мезоны с длинами следов, лежащих в пределах  $96 \leq \ell \leq 104$  см и  $48 \leq \ell \leq 52$  см. Ошибки величины  $\Delta R/R$ , приведенные на рис.2, определяются, в основном, величиной интервала значений  $\ell$ , в пределах которого производилось усреднение экспериментальных значений  $\Delta R/R$ .

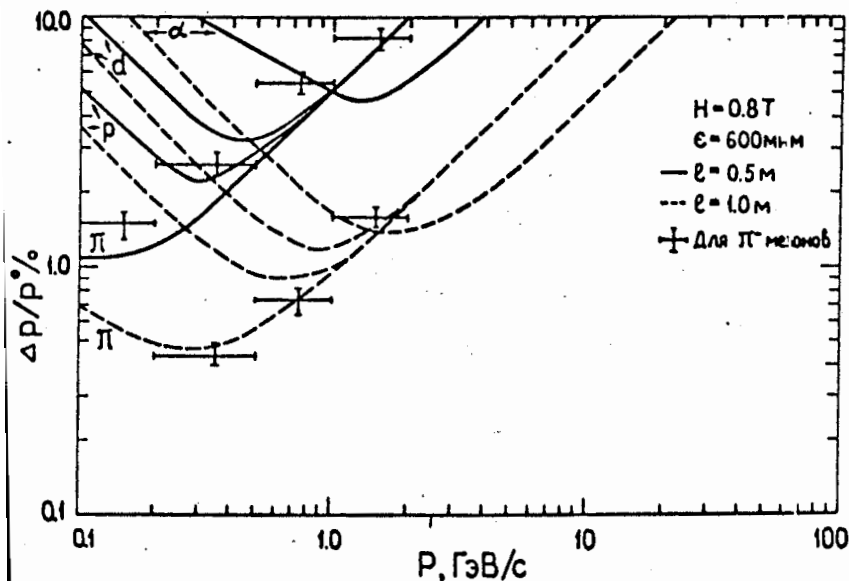


Рис.2. Зависимости импульсного разрешения от импульса для  $\Pi$ -мезонов, протонов, дейтонов и альфа-частиц, вычисленные по формуле (1) для 2-х значений следа 0,5 и 1 м при  $\xi_0 = 600$  мкм. Приведены также экспериментальные данные для  $\Pi^-$ -мезонов.

В табл.2 приведены величины, необходимые для анализа вкладов различных факторов в пространственную ошибку  $\epsilon_0$  с помощью формулы (3), для стримерных камер СКМ-200/1/ и SLAC/10/. Здесь  $X = 0$  обозначает плоскость наведения на резкость, а  $X_1$  и  $X_2$  обозначают крайние плоскости рабочего объема камеры ( $X_2 - X_1 = 600$  мм).

Таблица 2.

Параметр	$n_r$	M	$R = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\epsilon_r^2} + \frac{1}{\epsilon_L^2}}}$ л/мм	$\delta$	$\delta_{изм.}$	$\delta_{изм.} \cdot M$	$\Delta$ , мм		$0, I \cdot \Delta$ , мкм		$\epsilon_0$ мкм
							X=0	$X_1, X_2$	X=0	$X_1, X_2$	
камера				мкм							
СКМ-200	2,8	44	25	-	12,5	600	2,25	3,28	225	328	~600
SLAC	2,0	70	40	5	5	350	2,2	3,1	220	310	~360

Данные таблицы подтверждают вывод, сделанный в работе<sup>/11/</sup> относительно определяющего вклада в пространственную ошибку величины измерительной ошибки, которая при автоматических измерениях зависит практически, только от "шума" фотослоя - 5 мкм на фотопленке. Современное состояние фотометода позволяет рассчитывать на снижение "шума" фотослоя до 2,0 мкм<sup>/6/</sup>. Это свидетельствует о больших резервах повышения точности ( $\epsilon_0 \cong (2 \div 5) \text{ мкм} \cdot M \cong 50 \div 100$  мкм), зависящих от тракта регистрации, измерения и обработки снимков. Естественно, что при этом необходимо также реализовать возможности снижения  $\Delta$ , так как вклад  $0, I \cdot \Delta$  в  $\epsilon_0$  станет существенным. Эти возможности изучены на прототипе<sup>/12/</sup> новой стримерной камеры.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА НОВОЙ СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЫ.

Камера представляет собой герметизированный объем, заключенный в стальной корпус (рис.3). Она симметрична относительно средней плоскости. Конструкцией камеры предусмотрено плавное изменение зазора между электродами. Рабочие поверхности электродов выполнены из черненной латунной сетки с диаметром проволоки 0,07 мм и размерами ячейки 0,25 x 0,25 мм<sup>2</sup>.

Камера запускалась от радиоактивного бета-источника  $Ru^{106}$  с помощью сцинтилляционных счетчиков, работающих в режиме тройных совпадений. Фотографирование стримерных следов производится с четырех направлений одновременно (схвoзь электрод - по полю и

сбоку - поперек поля) фотокамерами типа РЖК-5 на аэрофотопленку ТИП-22 (I200 ед.ГОСТ). Питание камеры осуществляется от биполярного генератора /13/. Зарядное напряжение генератора до  $\pm 125$  кВ, длительность импульса - 18 нс.

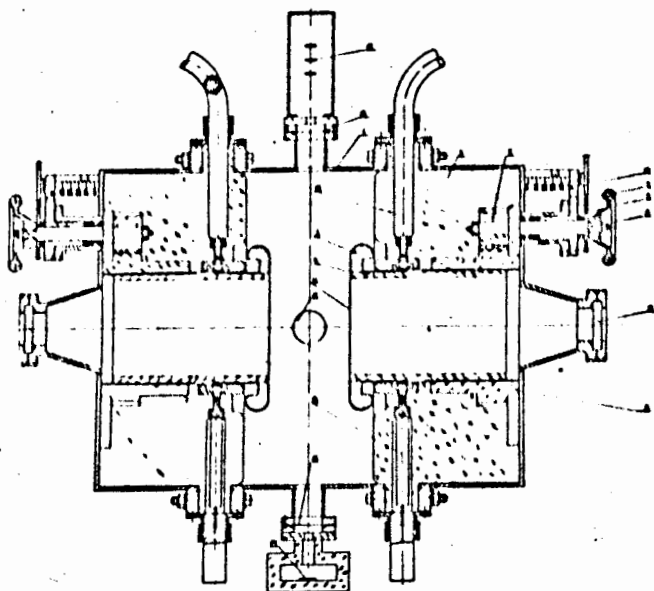


Рис.3. Схема прототипа новой стримерной камеры.

1 - стальной корпус; 2 - электроды; 3 - изоляторы; 4, 5, 6 - оргстекло; 7 - рукоятка; 8, 9, 10 - детали системы перемещения электродов; 11 - рабочая часть электрода; 12 - высоковольтный кабельный ввод; 13 - согласующее сопротивление; 14 - радиоактивный бета-источник; 15 - сцинтилляционные счетчики; 16 - лавсановые окна толщиной 0,15 мм; 17 - боковое окно для фотографирования.

С помощью этой камеры было выполнено исследование зависимости размеров стримеров от ряда параметров.

На рис.4 приведены полученные зависимости межэлектродного зазора ( $\delta$ ), средней длины ( $\ell_c$ ), диаметра ( $d_c$ ) стримеров и их плотности ( $n$ ) от величины давления неона ( $a$ ) в камере. Данные пока-

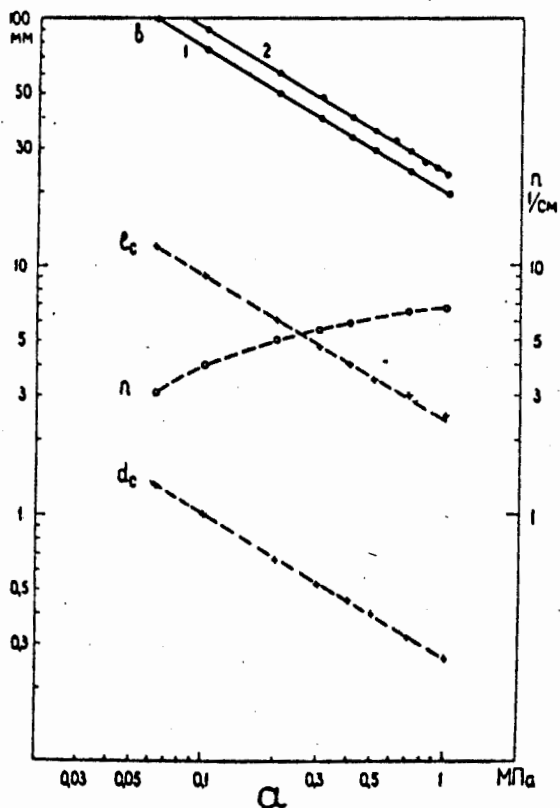


Рис.4. Зависимости межэлектродного зазора  $\delta$ , средних длин  $\ell_c$  и диаметра  $d_c$ , а также плотности  $n$  от величины давления неона в камере. Прямая 1 соответствует порогу чувствительности аэрофотопленки ТИП-22, прямая 2 - порогу чувствительности глаза.



зывают, что при фиксированной длительности высоковольтного импульса размеры стримеров в неоне (а также величина межэлектродного зазора)  $\sim I/\sqrt{a}$ , или точнее:

$$\begin{aligned}
 b &\sim a^{-0,58 \pm 0,02} & (6) \\
 l_c &\sim a^{-0,58 \pm 0,05} \\
 d_c &\sim a^{-0,58 \pm 0,01} .
 \end{aligned}$$

Такая же зависимость диаметров стримеров от давления газа подтверждается в работах<sup>/14,15/</sup>, в которых приводятся данные при давлениях газа до 20 и 25 атм, соответственно, если учесть разрешающую способность фоторегистрирующей аппаратуры<sup>/9/</sup>. Полученные результаты позволяют прогнозировать характеристики стримерного следа.

На этой камере была также исследована возможность работы с другими газами. В табл.3 приведены экспериментальные значения показателей степени при величине давления в (6) (в диапазоне 0 – 1 МПа) и величины отношений напряженности поля, при котором становится возможным регистрация стримерных следов в соответствующем газе, к напряженности поля в неоне при атмосферном давлении этих газов.

Таблица 3

Газ	Неон	Гелий	Водород	Азот	Аргон
Параметр наклона	$- 0,58 \pm 0,02$	$- 0,57 \pm 0,02$	$- 0,62 \pm 0,02$	$- 0,73 \pm 0,02$	$- 0,61 \pm 0,02$
$E_T/E_{\text{неон}}$	1	1,06	2,5	3,8	1,9
$d_T/d_{\text{неон}}$	1	0,7	0,5	0,5	0,5

В табл.3 приведены также величины диаметров стримеров в исследуемом газе к диаметру стримеров в неоне, рассчитанные в соответствии с результатами работы<sup>/9/</sup>. Эти значения экспериментально подтверждены для водорода и гелия.

Следует отметить, что в азоте и аргоне стримерные следы расплывчатые и для надежной регистрации треков в этих газах требуется специальные добавки<sup>/7/</sup>, хорошо поглощающие ультрафиолетовое излучение. В чистом гелии следы слабы, но в нем, как уже отмечалось выше, для улучшения качества стримеров достаточна небольшая добавка неона.

## 5. ОЦЕНКА ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЕШЕНИЯ СТРИМЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ 1,5 Т.

Для оценки импульсного разрешения спектрометра со стримерной камерой в магнитном поле  $H = 1,5$  Т, заполненной неоном и гелием, были выполнены расчеты по формуле (I) для  $\Pi$ -мезонов, протонов, дейтронов и альфа-частиц. Результаты этих вычислений приведены на рис. 5 для двух длин треков 0,5 и 1 м и значениями пространственной ошибки  $\epsilon_0 = 100, 200, 300, 600$  мкм. Приведены также расчетные данные для жидководородной пузырьковой камеры. Видно, что стримерная камера обладает лучшим импульсным разрешением, чем водородная камера в области импульсов до нескольких ГэВ/с. Использование гелия вместо неона существенно улучшает импульсное разрешение стримерной камеры.

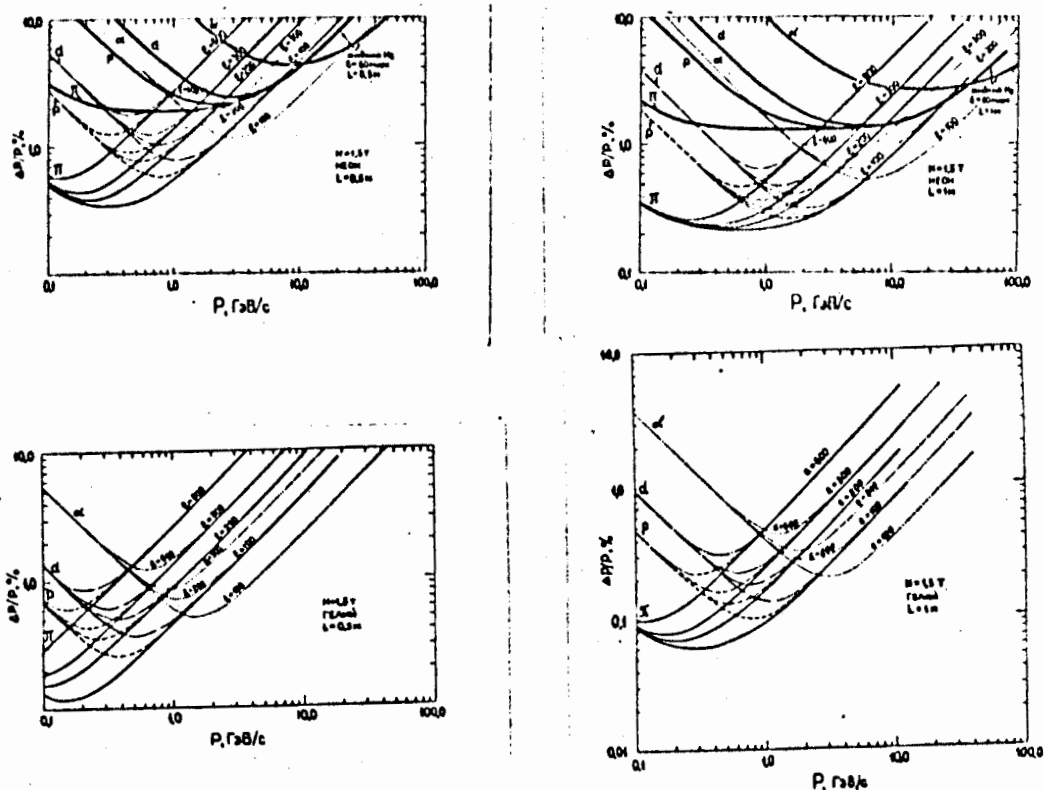


Рис. 5. Результаты вычислений по формуле (I) импульсных разрешений для камеры, наполненной неоном и гелием при  $H = 1,5$  Т. Для сравнения приведены расчетные зависимости импульсного разрешения для водородной камеры.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Дальнейшее улучшение разрешения стримерных спектрометров за счет увеличения рабочего объема камеры и величины магнитного поля

