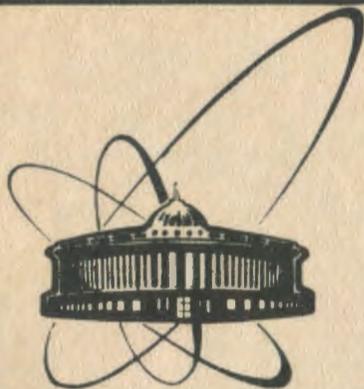


90-162



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

A 877

P9-90-162

О. В. Архипов, Л. В. Бобылева, В. Б. Бруданин,  
В. А. Дворников, В. И. Казаха, Г. И. Коннов,  
А. К. Красных, И. В. Кузнецов, В. Н. Марков,  
А. Ю. Никитский, Э. А. Перельштейн, А. И. Сидоров

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ СИЛЬНОТОЧНОГО  
ЗАМАГНИЧЕННОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В ЛИУ

1990

Разработан ряд методов для измерения энергетических спектров сильноточных электронных пучков /СЭП/: с помощью магнитного анализатора '1.2'; по изменению величин ускоряющего напряжения и тока в диоде '2.3'; с помощью метода частичного поглощения электронов в веществе '2.4-9'. В '6,7' измерения проводились с помощью зарядового анализатора; в '8' энергетический спектр восстанавливался по измеренному профилю энергосвыделения пучка в алюминиевых фольгах; в '9' предложено использовать многофольговый датчик в токовом режиме.

В настоящей работе приводятся результаты измерений энергии ускоренного в секции линейного индукционного ускорителя /ЛИУ/ замагниченного трубчатого электронного пучка методом частичного поглощения. Измерения проводились в диапазоне энергий  $0,5 \div \pm 1,5$  МэВ при токах пучка до 1,5 кА и длительности плато импульса  $\sim 60$  нс в стробе с изменяемой длительностью  $20 \div 60$  нс. Дано описание конструкции многофольгового датчика, работающего в токовом режиме, и методики восстановления энергетического спектра пучка.

## МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Для измерения кинетической энергии электронов методом частичного поглощения необходимо знать зависимость коэффициента пропускания поглотителя от энергии частиц при различной его толщине. Для электронов эта зависимость имеет универсальный характер '10', если толщина поглощающего слоя выражена в долях экстраполированного пробега.

Из некоторых известных таких зависимостей, пригодных в различных интервалах энергий для небольшого набора материалов, в данной работе были выбраны и использованы зависимости, приведенные в '11', поскольку они охватывают наиболее широкий диапазон энергий /0,08  $\div$  30,0 МэВ/ и широкий набор материалов. Согласно '11' эмпирическая зависимость для металлов коэффициента пропускания электронов от толщины слоя поглотителя  $x$  представляется следующим выражением:

$$\eta(x) = [1 + \exp(-S_0)] / \{1 + \exp[(S_0 + 2) \cdot x / R_{ex} - S_0]\}, \quad /1/$$

где  $S_0 = a_1 \cdot \exp[-a_2 / (1 + a_3 \cdot \tau_0^{a_4})]$ ;  $\tau_0 = E / m_0 c^2$  - энергия электронов  $E$  в единицах энергии покоя электронов;

$$a_1 = b_1 / Z^{b_2}; \quad a_2 = b_3 \cdot Z^{b_4}; \quad a_3 = b_5; \quad a_4 = b_6;$$

$$b_1 = 10,63 \pm 0,86 \quad b_4 = 0,463 \pm 0,046 \quad /2/$$

$$b_2 = 0,232 \pm 0,027 \quad b_5 = 0,042 \pm 0,018$$

$$b_3 = 0,22 \pm 0,041 \quad b_6 = 1,86 \pm 0,29.$$

Экстраполированный пробег электронов  $R_{ex}$  в веществе с массовым числом  $A$  и атомным номером  $Z$  представляется выражением:

$$R_{ex} = c_1 \cdot [1/c_2 \cdot \ln(1 + c_2 \cdot \tau_0) - c_3 \cdot \tau_0 / (1 + c_4 \cdot \tau_0^{c_5})], \quad /3/$$

$$\text{где } c_1 = 0,2335 \cdot A / Z^{1,209} \text{ [г / см}^2\text{]}; \quad c_2 = 1,78 \cdot 10^{-4} \cdot Z; \quad c_3 = 0,9891 - 3,01 \cdot 10^{-4} \cdot Z; \quad c_4 = 1,468 - 1,18 \cdot 10^{-2} \cdot Z; \quad c_5 = 1,232 \cdot Z^{0,109}.$$

Используя зависимости /1 ÷ 3/, можно рассчитать заряд  $Q_i$  электронов, поглощенных фольгой определенной толщины  $x_i$  при любой энергии в указанном выше диапазоне.

Измеряемые величины  $Q_i$  связаны с искомой функцией распределения по энергиям электронов в пучке  $\phi(E)$  интегральным уравнением

$$\frac{Q_i}{Q} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_i(x_i, E) \cdot \phi(E) \cdot dE \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad /4/$$

где  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$  - минимальная и максимальная энергии электронов в пучке;

$Q = \sum_{i=1}^N Q_i$  - суммарный заряд, поглощенный всеми фольгами.

Ядро уравнения /4/ выражается через коэффициенты пропускания /1/:

$$K_i(x_i, E) = \eta \left( \sum_{j=1}^{i-1} x_j, E \right) - \eta \left( \sum_{j=1}^i x_j, E \right). \quad /5/$$

Решение уравнения /4/ находится по итерационной процедуре, изложенной в /8/:

$$\phi^{(n+1)}(E) = \phi^{(n)}(E) \cdot \frac{\sum_{i=1}^N K_i(x_i, E) \cdot \frac{P_i}{Q_i^{(n)}}}{\sum_{i=1}^N K_i(x_i, E) \cdot \frac{P_i}{Q_i}}, \quad /6/$$

где  $P_i = \left(\frac{\delta Q_i}{Q_i}\right)^{-2}$  - множитель, учитывающий относительную ошибку при измерении заряда  $\frac{\delta Q_i}{Q_i}$  на  $i$ -й фольге, а

$$Q_i^{(n)} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K_i(x_i, E) \cdot \phi^{(n)}(E) \cdot dE. \quad /7/$$

Для получения начального приближения функция  $\phi(E)$  представлялась в виде

$$\phi(E) = A + B \cdot E. \quad /8/$$

Значения  $A$  и  $B$  определялись по методу наименьших квадратов. Использование начального приближения  $\phi(E)$  в виде распределения Гаусса несущественно меняет скорость сходимости итерационного процесса. Программа составлена на языке Фортран для ПЭВМ "Правец-16".

## МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

При анализе полученных энергетических спектров возникает вопрос о выборе численных значений коэффициентов  $b_1 \div b_6$  в формулах /2/ и  $c_1 \div c_5$  в формулах /3/ для конкретного материала фольг. В нашем случае из-за высокой плотности тока в трубчатом пучке /~ 40 А/мм<sup>2</sup>/ <sup>12</sup> был выбран титан, так как фольги из других материалов /алюминий, медь/ быстро разрушались.

Для уточнения численных значений коэффициентов  $b$  и  $c$  в формулах /2/÷/3/ было проведено несколько сеансов измерений коэффициентов прохождения конверсионных электронов радиоактивного источника <sup>207</sup>Bi через титановые фольги разных толщин. В этих измерениях использовался "теплый" /с энергетическим разрешением  $\Delta E \approx 30 \div 40$  кэВ/ кремниевый детектор; интегральное значение числа прошедших электронов фиксировалось амплитудным анализатором типа "Санберга".

Разность между падающим и прошедшим интегральными потоками электронов давала значение заряда на фольге конкретной толщины. По результатам этих измерений восстанавливался спектр <sup>207</sup>Bi.

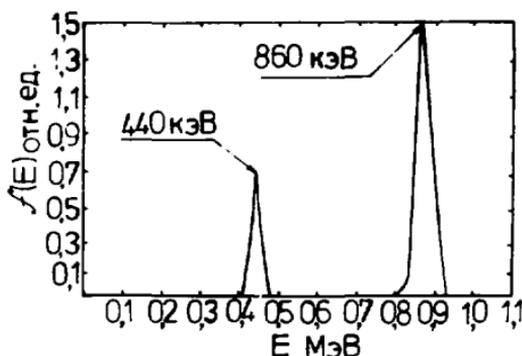
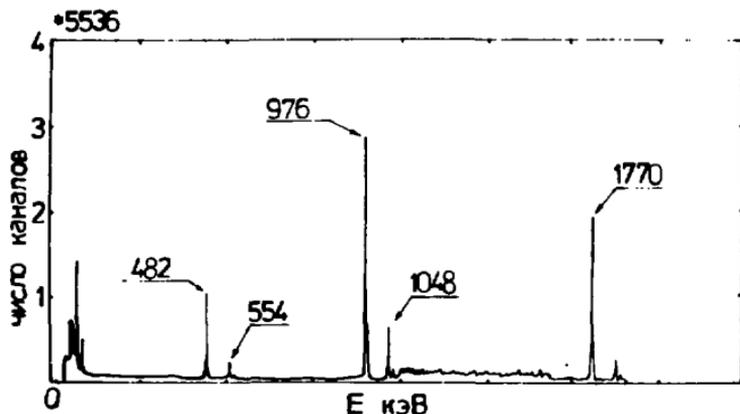


Рис.1. Энергетический спектр источника  $^{207}\text{Bi}$  /а/; восстановленный спектр /б/.

Большие погрешности измерений начальной части спектра из-за наличия нижних порогов регистрации как у детектора, так и у анализатора дают прогрессирующую ошибку при измерении интеграла заряда с увеличением толщины фольги. Спектр  $^{207}\text{Bi}$ , измеренный на "холодном" /с энергетическим разрешением  $\Delta E \approx 2$  кэВ/ кремниевом детекторе, приведен на рис.1а. Для сравнения на рис.1б приведен один из восстановленных спектров. В расчетах использовались средние значения коэффициентов  $b$  и  $c$ , приведенные в /2/÷/3/. Из рис.1 видно, что значения энергий восстановленных пиков конверсионных электронов  $^{207}\text{Bi}$  получились заниженными на  $10 \div 15\%$ . На рис.1а часть спектра с энергией выше 1000 кэВ приведена с усилением в 510 раз.

Была предпринята другая попытка уточнения численных значений указанных выше коэффициентов с помощью электронного пуч-

ка линейного резонансного ускорителя ЛУЭ /МИФИ, Москва/, имеющего длительность огибающей ускоряющего импульса 0,8 мкс, период между ускоряющими импульсами 1,5 мкс, ток  $10 \div 15$  мкА, с энергией, изменяемой в диапазоне  $0,7 \div 1,8$  МэВ.

Для мониторингирования пучка на выходе ЛУЭ был установлен магнитный анализатор с углом поворота  $90^\circ$  и радиусом поворота 25 см. Изменением величины магнитного поля анализатора из широкого спектра пучка вырезался узкий энергетический пик с относительной шириной  $\pm 2\%$ . Пучок из магнитного анализатора через коллимационную щель и вакуумное окно попадал на титановые фольги датчика, каждая из которых через коммутатор была связана с микроамперметром. Измерялось распределение тока пучка по восьми титановым фольгам /толщина первой из них была 200 мкм, остальные - по 300 мкм/, собранным в кассету. Величина магнитного поля В в анализаторе, соответствующие значения измеренных токов с восьми фольг /в мкА/, рассчитанные по измеренной величине индукции поля В ( $E_{изм}$ ) и программно восстановленные ( $E_{восст.}$ ) значения энергий пучка /при тех же средних величинах параметров  $b$  и  $c$ / приведены в таблице. Для уменьшения погрешности при измерении малых токов с последних фольг измерялся их суммарный ток, который и вводился потом в программу обработки. Погрешность измерения токов составляла  $\pm 5\%$ .

Таблица

№	В Гс	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	E <sub>изм.</sub> МэВ	E <sub>восст.</sub> МэВ	$\frac{\Delta E}{E_{изм}}$
1	191	0,65	0,92	0,56	0,13	$\Sigma = 0,02$				0,74	0,79	+6,0%
2	215	0,22	0,41	0,32	0,12	$\Sigma = 0,02$				0,875	0,86	-1,4%
3	230	0,25	0,50	0,39	0,20	0,04	$\Sigma = 0,01$			0,96	0,94	-2,2%
4	252	0,18	0,43	0,39	0,25	0,11	$\Sigma = 0,03$			1,08	1,09	+0,4%
5	269	0,20	0,51	0,50	0,36	0,19	0,06	$\Sigma = 0,01$		1,18	1,10	-6,8%
6	295	0,09	0,26	0,29	0,24	0,17	0,08	$\Sigma = 0,02$		1,33	1,25	-6,0%
7	303	0,04	0,11	0,13	0,115	0,09	0,05	$\Sigma = 0,02$		1,38	1,35	-2,2%
8	326	0,025	0,06	0,08	0,07	0,065	0,05	$\Sigma = 0,025$		1,51	1,55	+2,6%
9	343	0,02	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05	$\Sigma = 0,03$		1,61	1,60	-0,6%
10	362	0,09	0,25	0,31	0,30	0,29	0,25	0,14	0,08	1,72	1,81	+5,2%

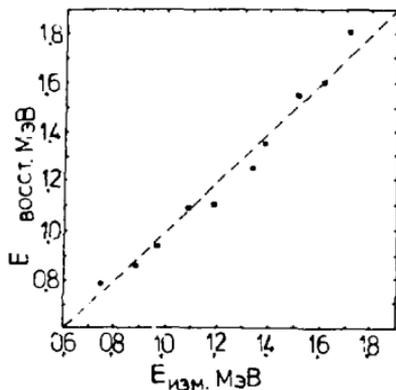
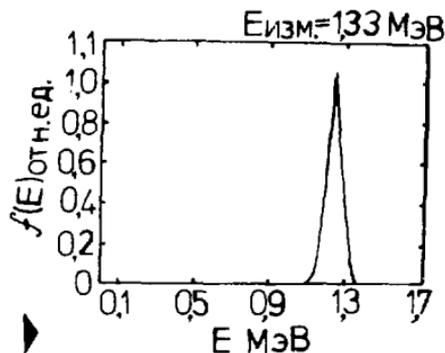


Рис. 3. Восстановленный энергетический спектр электронного пучка ЛУЭ после магнитного анализатора для  $E_{изм} = 1,33$  МэВ.

Рис. 2. Зависимость  $E_{восст.}$  от  $E_{изм.}$



На рис. 2 показана зависимость  $E_{восст.}$  от  $E_{изм.}$ , построенная по данным проведенных измерений /см. таблицу/. Максимальное отклонение  $E_{восст.}$  от  $E_{изм.}$  составляет  $\pm 6\%$ .

На рис. 3 приведен восстановленный энергетический спектр для  $E_{изм.} = 1,33$  МэВ; соответствующее значение  $E_{восст.} = 1,25$  МэВ.

На основании данных таблицы и зависимости, приведенной на рис. 2, можно сделать вывод о том, что численные коэффициенты  $b$  и  $c$  в выражениях /2/ ÷ /3/ выбраны для титана достаточно корректно и погрешность в определении коэффициентов пропускания в данном диапазоне энергий /0,7 ÷ 1,8 МэВ/ может быть оценена как  $\pm 6\%$ .

### КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА

В экспериментах с замагниченным трубчатом электронным пучком, энергия которого могла изменяться в диапазоне 0,5 ÷ ÷ 1,5 МэВ, а ток от 0,5 до 1,5 кА [12], использовался многофольговый датчик, конструкция которого показана на рис. 4. Первые семь фольг датчика /1/ были изготовлены из титана толщиной 200 мкм, а последняя фольга /2/ имела толщину 600 мкм и являлась коллектором полного поглощения для электронов, прошедших семь предыдущих фольг. Все фольги были нагружены на одинаковые /с точностью  $\pm 0,5\%$ / низкоиндуктивные шунты /3/, составленные из параллельно включенных резисторов типа ТВ0, распределенных равномерно по азимуту /суммарное  $R_{ш} = 1$  Ом/. Сигналы с шунтов

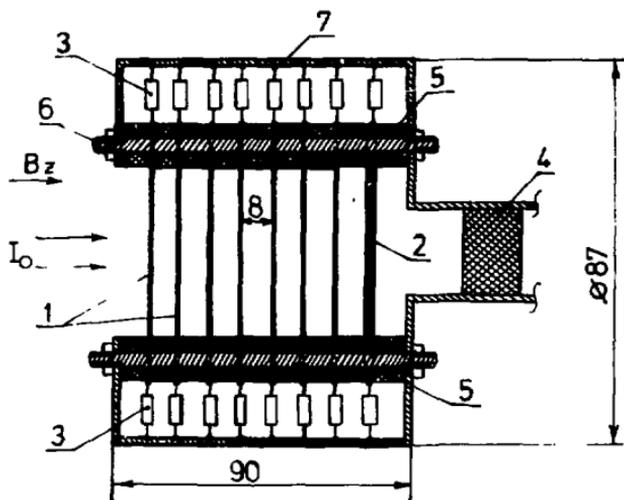


Рис.4. Конструкция датчика: 1,2 - титановые фольги; 3 - шунты; 4 - вакуумное уплотнение; 5 - изолирующие шайбы; 6 - стягивающие шпильки; 7 - внешний экран датчика.

выводились через специальный узел /4/, обеспечивающий развязку датчика по вакууму. Фольги разделялись между собой с помощью керамических изолирующих шайб /5/. Весь пакет фольг стягивался с помощью изолированных шпилек /6/. Расстояния между всеми фольгами выбирались такими, чтобы амплитуда наводки на соседних фольгах при появлении сигнала на одной из них была не более  $1 \div 2\%$ . Временное разрешение датчика, измеренное с помощью генератора прямоугольных импульсов с фронтами  $\sim 1$  нс, было не хуже 2 нс.

Для предотвращения перегрева фольг датчика ускоритель работал с частотой 0,1 Гц. При обработке результатов измерений влияние электронов вторичной эмиссии с фольг не учитывалось в силу малости эффекта. Для титана коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma = 2\%^{13/}$ . Кроме того, в нашей конструкции датчика для любой фольги кроме первой баланс токов вторичных электронов /приходящих и уходящих/ будет уравновешен  $^{15/}$ , что также снижает влияние этого эффекта.

#### СХЕМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Структурная схема регистрирующей аппаратуры спектрометра приведена на рис.5. Сигналы с шунтов по кабелям длиной около

40 метров /  $\rho = 50 \text{ Ом}$ / поступают на линейки аттенюаторов с согласованными сопротивлениями входов и различными коэффициентами деления, кратными 2 и 5 /с точностью  $\pm 0,5\%$ /. Сигналы ослабляются до уровня менее 5 В, что является максимально допустимым напряжением на входе зарядово-цифрового преобразователя /ЗЦП/. В схеме используется ЗЦП типа КА-010<sup>'14'</sup> /8 входов, 8 разрядов/ с дополнительными резисторными делителями на всех измерительных входах.

Сигнал строба, открывающего входы ЗЦП на измерение, формируется с помощью амплитудного дискриминатора и формирователя NIM-сигнала. В качестве исходного берется сигнал с предоконечного каскада модулятора ЛИУ. При изменении уровня срабатывания амплитудного дискриминатора изменяется и "ширина" строба / $20 \div 60 \text{ нс}$ /. Сформированный сигнал через линию задержки с дискретным ручным переключением подается на вход "пуск" ЗЦП. Для настройки режима работы электроники используется осциллограф. Ручное переключение задержки позволяет синхронизовать на экране осциллографа строб с сигналами спектрометра.

Все используемые модули /кроме аттенюаторов/ выплнены в стандарте КАМАК и размещаются в одном крейте. Управление от ПЗВМ "Правец-16" производится через контроллер КК-009<sup>'15'</sup>. Управляющая программа составлена на языке Паскаль.

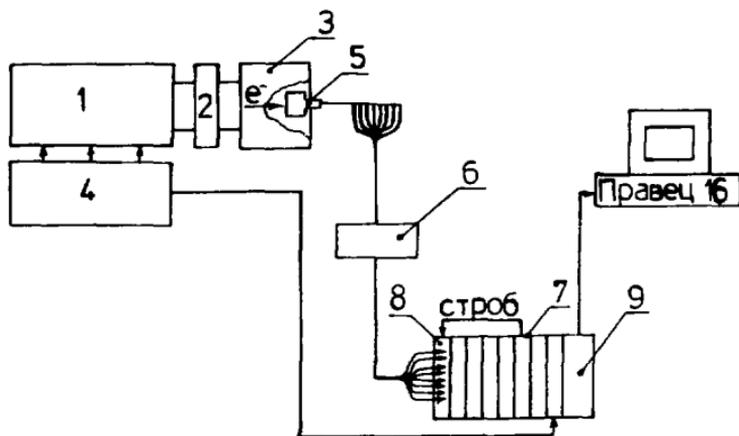


Рис.5. Схема измерений: 1 - ускоряющая секция ЛИУ; 2 - межсекционный соленоид; 3 - дополнительный соленоид; 4 - модулятор; 5 - многофольговый датчик; 6 - линейка аттенюаторов; 7 - крейт КАМАК; 8 - ЗЦП; 9 - контроллер.

Программа статистической обработки данных выполняет первичный анализ результатов. Для каждой  $i$ -й фольги датчика вычисляется значение измеренного заряда  $\bar{Q}_i$ , усредненное по количеству проведенных измерений, среднеквадратичное отклонение  $\delta Q_i$ . Затем отбраковываются те значения заряда /для каждой фольги/, которые отличаются от  $\bar{Q}_i$  по модулю более чем на два среднеквадратичных отклонения, и находятся новые значения  $\bar{Q}_i$ . Полученные таким образом значения  $\bar{Q}_i$  и  $\delta Q_i$  используются затем при восстановлении энергетического спектра электронов с помощью итерационной процедуры /6/.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Измерение энергии ускоренного в ЛПУ трубчатого замагниченного пучка проводилось на установке, описание которой дано в [12]. Диаметр пучка составлял 14 мм, толщина трубки  $0,5 \pm 0,8$  мм.

Датчик находился в сильном магнитном поле  $B_z = 1$  Тл/. Все сигналы с шунтов интегрировались в стробу длительностью  $20 \div 30$  нс.

На рис.6 показано несколько синхронизированных осциллограмм сигналов с шунтов 1-й, 3-й, 5-й фольги и последней, 8-й фольги, а также осциллограмма строба.

При изменении энергии пучка изменялся характер распределения зарядов  $\bar{Q}_i$  на фольгах. На рис.7а показаны измеренные в стробе 20 нс распределения зарядов по фольгам для трех энергий: 0,9; 1,1; 1,5 МэВ. На рис.7б показаны соответствующие восстановленные энергетические спектры пучков для этих энергий.

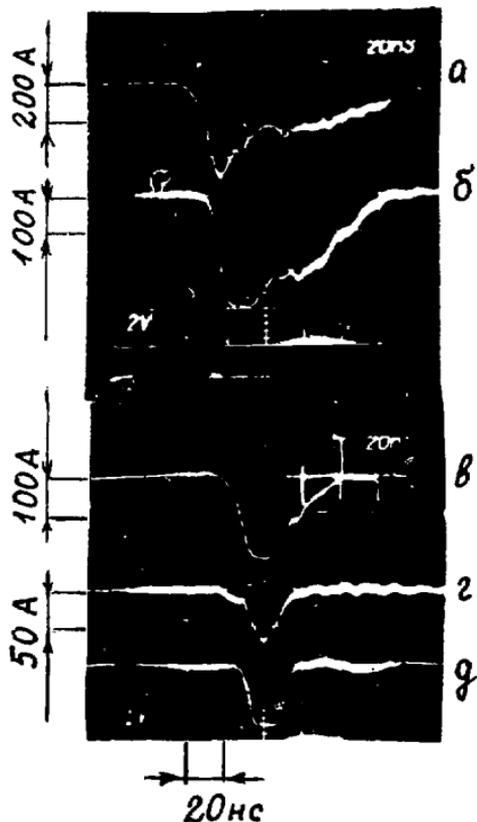
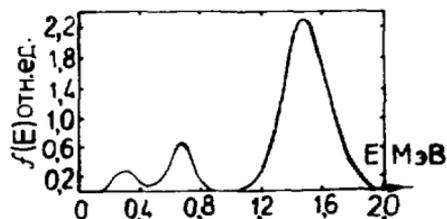
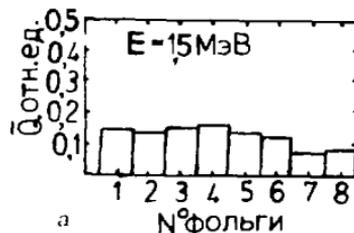
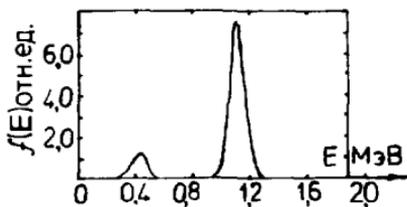
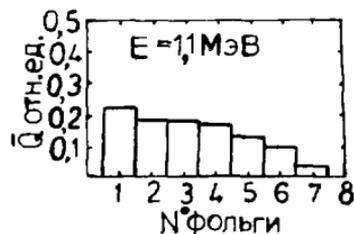
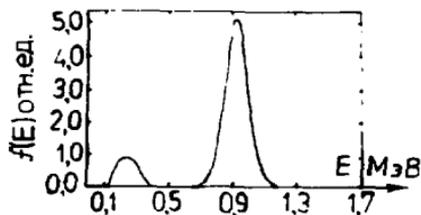
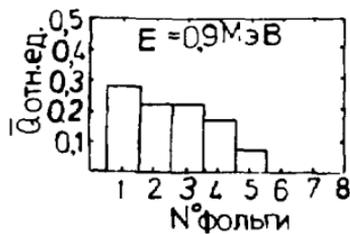


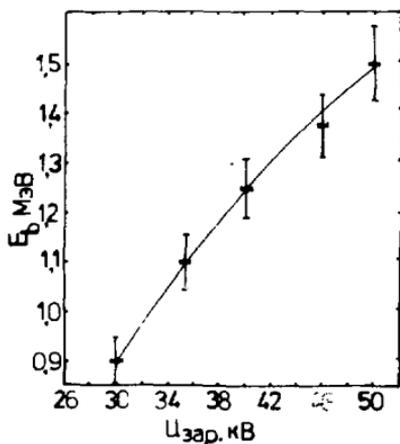
Рис.6. Осциллограммы сигналов с фольг: а/ с фольги № 1; б/ № 3; в/ № 5; г/ № 8; д/ строб.



а

б

Рис. 7. Распределение зарядов  $\bar{Q}_i$  /в строке/ по фольгам датчика /а/; соответствующие восстановленные энергетические спектры /б/.



На рис. 8 показана измеренная зависимость энергии ускоренного в секции ЛИУ <sup>127</sup> пучка электронов от величины зарядного напряжения на накопительной емкости модулятора.

Погрешность измерения энергии электронов обусловлена погрешно-

Рис. 8. Измеренная зависимость энергии ускоренного в ЛИУ замагниченного пучка электронов от зарядного напряжения на накопительной емкости модулятора.

стями в коэффициенте пропускания и суммарной погрешностью измерения зарядов на фольгах /в стробе/  $Q_i$ . Систематическая ошибка при измерении  $Q_i$  мала /~ 1%/ , суммарная же погрешность определяется в основном статистическим разбросом и составляет величину до 7%. Ошибка в коэффициенте пропускания не превышает 6%. Созданная система позволяет измерять среднюю энергию в спектре с точностью не хуже 10%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе метода частичного поглощения в титановых фольгах измерена энергия ускоренного в секции ЛИУ пучка электронов с высокой плотностью энергоснабжения /до ~30 Дж/см<sup>2</sup> на одной фольге/. Измерения проводились в токовом режиме в различных стробируемых интервалах 20 ÷ 60 нс.

Измерение энергии ускоренного в секции ЛИУ замагниченного трубчатого пучка электронов с током до 1,5 кА и длительностью по основанию ~100 нс проведено в диапазоне энергий 0,5 ÷ 1,5 МэВ.

2. Для проведения измерений создан многофольговый датчик и электронная система обработки информации в режиме on-line. Точность измерения средней энергии в спектре не хуже 10%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов А.И., Дубинов Е.Г., Кудасов Б.Г. - ПТЭ, 1971, № 3, с.31.
2. Крастелев Е.Г., Месхи Г.О., Яблоков Б.Н. - ПТЭ, 1976, № 3, с.39.
3. Walter I.V. - IEEE Trans. Nucl. Sci., 1970, NS-17, No.6, p.284.
4. Балашов А.П. - ПТЭ, 1974, № 1, с.27.
5. Степанов А.Д. - Препринт ОИЯИ, Р9-82-753, Дубна, 1982.
6. Дергобузов К.А. и др. - ПТЭ, 1975, № 1, с.29.
7. Бугаев С.П. и др. - ПТЭ, 1979, № 6, с.44.
8. Филимончева П.И. и др. - ПТЭ, 1979, № 6, с.40.
9. Жабицкий В.М. и др. - В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, т.1, с.75.
10. Ebert P.J., Lauzon A.F., Lent E.M. - Phys.Rev., 1969, v.183, No.2, p.422.
11. Tatsue Tabata and Rinsuke Ito - Nucl. Instr. Meth., 1975, v.127, No.3, p.429.
12. Архипов О.В. и др. - Сообщение ОИЯИ, Р9-89-613, Дубна, 1989.

13. Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. - Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1980.
14. Антюхов З.А. и др. - Сообщение ОИЯИ, 10-83-900, Дубна, 1983.
15. Георгиев А., Чуркин Н.Н. - Сообщение ОИЯИ, Р10-88-381, Дубна, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 марта 1990 года.