

Г-256

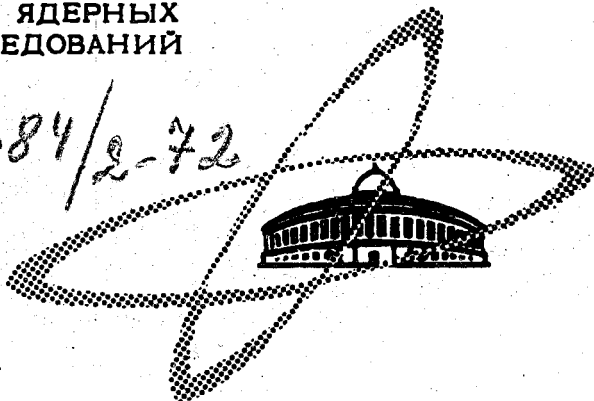
ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

2384/2-72

17/III-72

P16 - 6433



В.Я.Гвоздев, Л.Н.Зайцев, И.Ф.Колпаков, А.П.Крячко,  
Н.М.Никитюк, Н.И.Павлов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРОТОНОВ  
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

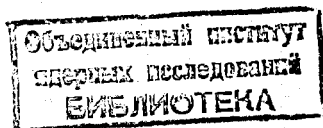
1972

P16 - 6433

В.Я.Гвоздев, Л.Н.Зайцев,\* И.Ф.Колпаков, А.П.Крячко,  
Н.М.Никитюк, Н.И.Павлов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРОТОНОВ  
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Направлено в журнал "Particle Accelerators"



---

\* Московский Инженерно-физический институт

## В в е д е н и е

В качестве функции распределения источников излучения обычно принимают <sup>/1,2/</sup> распределение по камере или ионопроводу вторичных частиц, образованных в результате взаимодействия протонов со стенками камеры и с мишенями. Качественная картина формирования функции распределения источников  $S_0(z)$  по азимуту  $z$  рассмотрена в работе <sup>/3/</sup>.

На основании этой работы можно записать:

$$S_0(z) = S_m(z) + S_c(z), \quad (1)$$

где  $S_m(z)$  — функция, обусловленная потерями протонов после взаимодействия с мишенями при энергии  $E_0$ ;  $S_c(z) = \int S(E'_0, z) dE'_0$  — функция, обусловленная потерями протонов в процессе ускорения с переменной энергией  $E'_0$ .

Интегралы по  $z$  функций распределения пропорциональны потерям протонов <sup>/2/</sup>. При работе с внутренними мишенями:

$$a_m L_m \gg a_c L_c, \quad (2)$$

где  $a_m, a_c$  — коэффициенты пропорциональности,  $L_m, L_c$  — интегралы по  $z$  соответствующих функций распределения.

В этом случае  $S_0(z)$  можно принимать по результатам измерений интегральными детекторами за время  $t_{(\text{измер.})} \gg t_{(\text{цикл.})}$  /2-5/.

При эффективном выводе пучка пренебрегать функцией  $S_c(z)$  нельзя. Это очевидно из следующего выражения:

$$L_0 = \overline{I_0} [ (1 - \eta) + \overline{\chi} ] , \quad (3)$$

где  $L_0$  - полное число потерянных протонов за цикл;  $\overline{I_0}$  - средняя интенсивность в конце ускорения;  $\eta$  - эффективность вывода пучка;  $\overline{\chi} = a_c L_c / a_m L_m$ . Например, при  $\eta = 0,95$  и  $\overline{\chi} \approx 0,3$  (см. работу /6/) радиационная обстановка вблизи кольца ускорителя будет обусловлена потерями протонов в процессе ускорения. Таким образом, при выводе пучка надо знать отдельно все функции, входящие в выражение (1).

В настоящей работе предпринята попытка получить функцию распределения  $S_c(E'_0, z)$  экспериментальным путем и сформировать источники излучения для режима медленного вывода пучка и увеличения интенсивности синхрофазотрона.

#### Экспериментальная аппаратура

Функцию  $S_c(E'_0, z)$  невозможно измерить с помощью интегральных детекторов, поэтому была разработана "Система контроля потерь частиц" (КПЧ), состоящая из сцинтилляционных датчиков, управляющей и счетной аппаратуры.

С помощью системы КПЧ можно в процессе ускорения протонов измерять число вторичных частиц в 10 временных интервалах с заданной длительностью от 10 до 300 мсек.

Начало отсчета временных интервалов задается "импульсом инжекции" с переменной задержкой от 200 до 2000 мсек с шагом 200 мсек.

Одновременно со всех датчиков, расположенных по периметру ускорителя, определяется счет в первом интервале за первый цикл, затем во втором интервале за второй цикл и т.д. Можно измерять счет многократно в одном временном интервале за несколько циклов.

Блок-схема системы показана на рис. 1. Датчики можно произвольно размещать по кольцу ускорителя. Два из них образуют телескоп, включенный в схему совпадений, для мониторингования интенсивности  $\bar{T}_0$ . Сигналы с датчиков с амплитудой не менее 0,3 в поступают на формирователи 2Ф100 (порог 0,1 в), а затем через клапаны-ворота - на пересчетные схемы.

Клапаны-ворота представляют собой схему совпадений, на один вход которой подается стробирующий импульс с устройства управления (задающего временные интервалы), а на другой вход поступает сигнал с формирователя. Сигнал от телескопа поступает на одну из пересчетных схем, минуя клапаны-ворота. Показания с пересчетов выдаются на ленты цифropечатающих машин. При большом объеме информации предусматривается работа системы с ЭВМ в режиме "on-line".

Датчики состоят из сцинтиллятора (полистирол с добавлением терфенила и РОРОР), световода из плексигласа, ФЭУ-36 с делителем и кожуха. Сцинтиллятор с диаметром 3,5 см и толщиной 2,5 см закрыт светозащитным колпачком из алюминия толщиной 0,1 см. Под колпачком находится светодиод АЛ-102А для контроля работы датчика, когда ускоритель остановлен.

Детектор должен быть помещен вблизи камеры ускорителя, поэтому потребовалось отвести ФЭУ за пределы сильного магнитного поля. Световод длиной 180 см и экранировка ФЭУ, состоящая из 3-х слоев стали и одного слоя пермаллоя, обеспечили уверенную работу датчиков в магнитных полях с напряженностью  $5 \cdot 10^2$  эрстед.

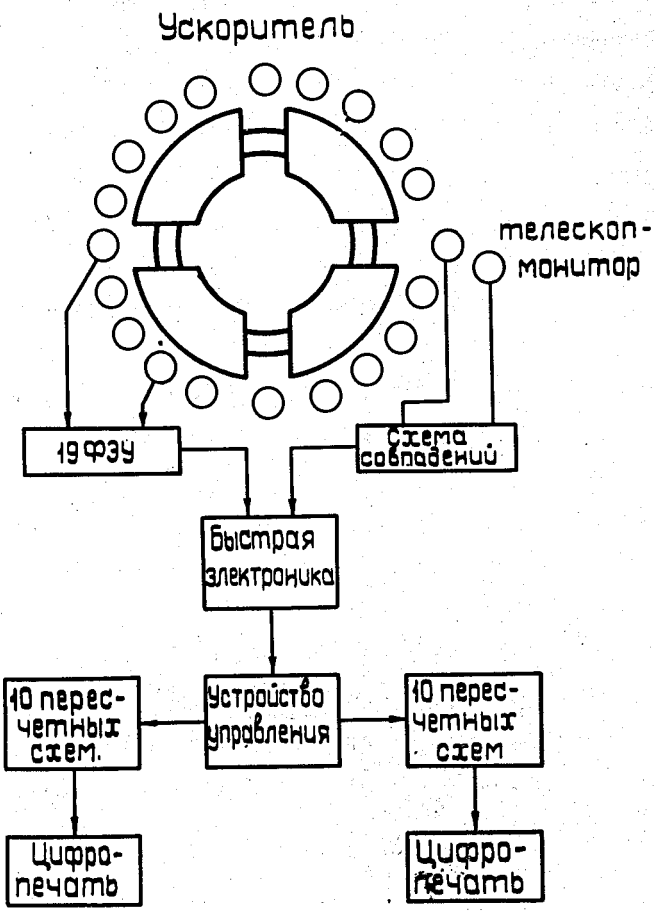


Рис. 1

### Геометрия и условия эксперимента

На рис. 2 показано расположение датчиков у вакуумной камеры синхрофазотрона в различных опытах. Всего было проведено четыре опыта (I-IV). Максимальное число одновременно работающих датчиков - 16. Условия эксперимента<sup>1/3/</sup> были одинаковы для всех опытов, отличающихся только расположением датчиков.

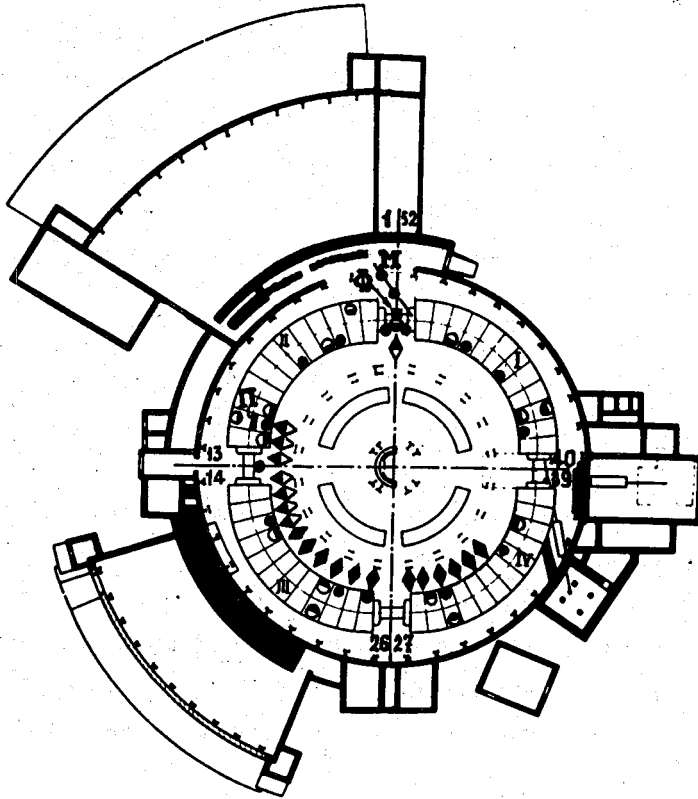


Рис. 2. Расположение датчиков на синхрофазотроне. М - монитор; Ф - формагнит; П - мишень-перехватчик; ● - I опыт; ● - II опыт; ◆ - III опыт; ◆ - IV опыт; 1 + 52 - участки разделения кольца  $\Delta z = 4$  м.

Сброс пучка производили на септум формагнита, в качестве перехватчика вторичных частиц служила пневматическая мишень, которую устанавливали на радиусах 10, 15, 20 см от равновесной орбиты. Размер мишени  $10 \times 10 \times 15 \text{ см}^3$ .

Датчики были помещены в окна ярма магнита и на прямолинейных промежутках. В детектор попадают первичные протоны, прошедшие стенку камеры без взаимодействия, протоны, претерпевшие в ней упругое взаимодействие, а также вторичные частицы: нейтроны,  $\pi$ -мезоны,  $\gamma$ -кванты, позитроны, электроны и другие частицы, которые образовались как в стенке камеры, так и в окружающих детектор материалах.

При изменении энергии  $E_0'$  и напряженности магнитного поля состав и спектрально-угловое распределение вторичных частиц в точках детектирования будет непрерывно меняться. В таких сложных условиях можно сделать только грубую оценку регистрации различных компонент излучения, предварительно задавшись пороговой энергией регистрации.

Пороговую энергию регистрации определяли из условия дискриминации позитронов распада  $^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + e^+$  вследствие активизации углерода. Если позитрон распада углерода не регистрируется, то пороговая энергия для протонов и  $\pi$ -мезонов соответственно равна 14 и 8,5 Мэв. С учётом разницы конверсионной эффективности оценили пороговые энергии регистрации других вторичных частиц.

Спектры протонов,  $\pi$ -мезонов и нейтронов были вычислены в предположении однократного взаимодействия первичного протона с ядром. Спектрально-угловое распределение  $d^2N / dE d\Omega$  принимали таким же, как в работе /7/, а ионизационные потери энергии заряженных частиц  $dE / dt$  - как в /8,9/.

В табл. 1 приведены оценки степени регистрации некоторых компонент излучения. Из таблицы видно, что датчики в основном регистрируют протоны и  $\pi$ -мезоны. Для решения поставленной задачи, вообще говоря,



Таблица I

ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ РЕГИСТРАЦИИ НЕКОТОРЫХ  
КОМПОНЕНТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Вид частицы ( $i$ )	$E$ пор, МэВ	Средняя эффективность регистрации ( $f_i$ ), %	$\frac{P_i}{P_{\Sigma}}$	$\frac{P_i \cdot f_i}{P_{\Sigma} \cdot f_{\Sigma} + P_{\Sigma} \cdot f_i}$
$\alpha$	8,5	100	1	0,79
$\beta$	14	100	0,26	0,21
$\bar{n}$	4	10	0,76	0,06
$\mu$	8,5	100	0	0
$\gamma$	2	0,06	6,8	0,04
$\beta^{\pm}$	2,3	100	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$

$P_i$  - плотность потока соответствующего сорта вторичных  
частиц.

степень регистрации не играет существенной роли. Какой бы компонент излучения не регистрировался, счёт всегда будет пропорционален потерям протонов. Однако чтобы перейти от счёта вторичных частиц к абсолютному числу потерянных протонов, надо знать изменение числа вторичных регистрируемых частиц с энергией  $E'_0$ .

### Энергетическая градуировка

Число вторичных частиц, соответствующих числу потерянных протонов, определяется как

$$N(E'_0) / a(E'_0),$$

где  $a(E'_0)$  — градуировочный коэффициент, учитывающий множественность частиц и их сорт в зависимости от энергии. В табл. 2 приведены плотности потоков протонов и  $\pi$ -мезонов, полученные интегрированием вычисленных спектров от  $E$  (пороговая) до  $E'_0$  и по ним определена зависимость  $a(E'_0)$ . Поскольку спектры протонов и  $\pi$ -мезонов определены приближенным расчётом, то, учитывая возможность регистрации других частиц, нашли оригинальный способ градуировки самим ускорителем.

В различные моменты времени  $t \rightarrow E'_0$  в систему ускоряющего напряжения подавали от генератора одиночные "запирающие" импульсы длительностью от 10 до 50 мксек. Ускоряющее напряжение на время прерывалось, а затем восстанавливалось вновь. От этого менялись границы сепаратрисы и часть протонов высаживалась на стенки камеры. Число высадившихся протонов, которое зависело от длительности импульса, определяли по пикап-электроду как процент от средней интенсивности  $\bar{I}_0$ . Время высадки протонов чётко фиксировалось всеми датчиками системы КПЧ.

Таблица 2

Плотность потока протонов и  $\pi$ -мезонов в точке детектирования на один потерянный протон,  $(\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1})/(\text{см}^{-1} \text{сек}^{-1})$

Интервал от 14 Мэв до $E'_0$ , Мэв $\times 10^{-3}$	Протоны $\times 10^2$	Интервал от 8,5 Мэв до $E'_0$ , Мэв $\times 10^{-3}$	$\pi$ -мезоны $\times 10$	Протоны + $\pi$ -мезоны $\times 10$	$\alpha(E'_0)$ , отн. ед.
$E'_0 = I$	1,70	$E'_0 = I$	0,80	0,97	1,00
3	2,21	3	1,36	1,58	1,63
4	2,24	4	1,76	1,99	2,06
5	2,25	5	2,35	2,57	2,68
6	3,00	6	2,90	3,20	3,31
7	3,39	7	3,50	3,99	4,11
8	3,61	8	4,59	4,95	5,12
9	4,22	9	5,43	5,85	6,05
10	5,23	10	6,48	7,00	7,21

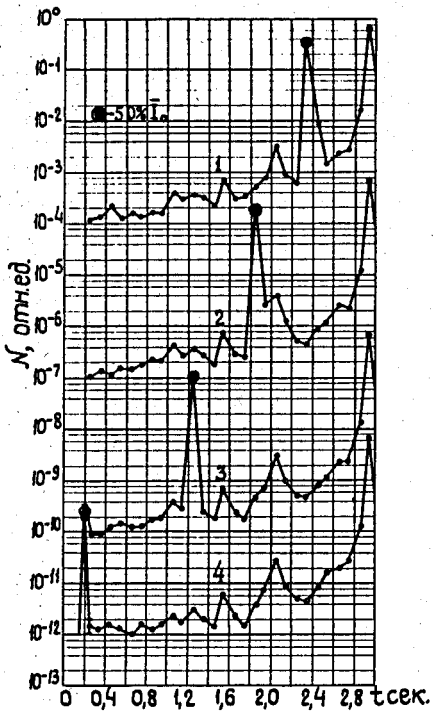
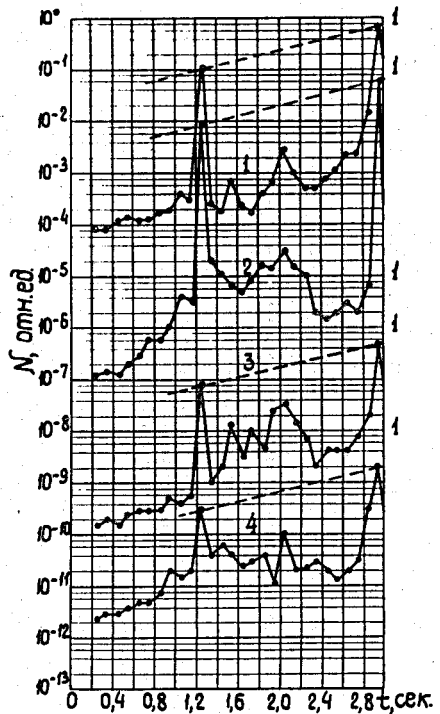


Рис. 3. Функция  $\bar{N}(t)$  для одного из датчиков при: 2,3 сек (1); 1,89 сек (2); 1,28 сек (3); 0,2 сек (4).

Рис. 4. Функция  $\bar{N}(t)$  для различных датчиков при потерях 50%  $\bar{I}_0$ .  
1 - датчик №3 (рис. 8); 2 - №1;  
3 - №6; 4 - №8.



На рис. 3 даны зависимости счёта  $\bar{N}(t)$ , на которых видны пики, соответствующие заданному проценту потерь протонов. Подробный анализ функций  $\bar{N}(t)$  для всех других датчиков и различных процентов потерь протонов (1, 10, 30 и 50%) показал, что наклон прямых (пунктир на рис. 4), проходящих через вершины пиков, постоянный в пределах ошибок измерений. На основании этого определена зависимость  $a(E'_0)$ , которая справедлива для всех датчиков системы КПЧ (рис. 5).

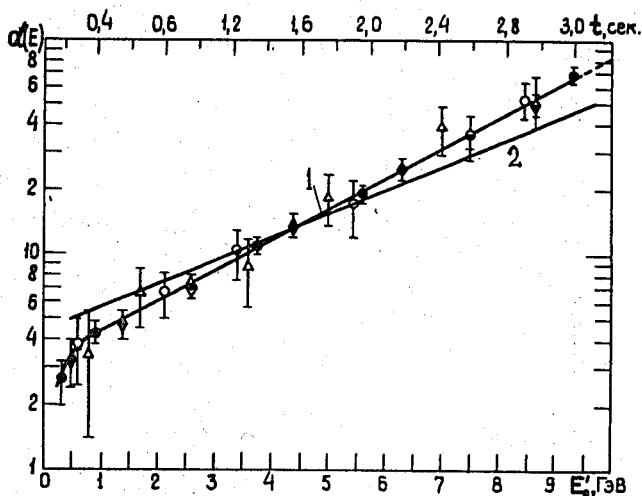


Рис. 5. Градуировочный коэффициент  $a(E'_0)$ . 1 - эксперимент, 2 - расчёт (табл. 2): (расчёт и эксперимент связаны при 5 ГэВ).

## Азимутальная градуировка

Функцию распределения потерь протонов по азимуту определяли по результатам измерений несколькими датчиками. Из-за разброса своих параметров все они дают различные значения счёта, которые необходимо привести к истинным значениям, обусловленным только потерями протонов:

$$N_i(z) / a_i(z) ,$$

где  $a_i(z)$  - градуировочный коэффициент.

При градуировке один из датчиков принимали за "эталонный", остальные, градуируемые, помещали вместе с эталонным в одну из точек кольца ускорителя. Измерения датчиками проводили во временном интервале, соответствующем сбросу пучка на септум формагнита. В этом случае наблюдался максимальный счёт и соответственно уменьшалась погрешность градуировки.

При градуировке делали не менее 10 измерений счёта, тогда, с учётом погрешности:

$$a_i = \bar{a} + \sqrt{S_a^2 / 10} , \quad (5)$$

где  $\bar{a}$  - среднее значение коэффициента,  $S_a^2$  - дисперсия для взаимно коррелирующих величин. Азимутальная градуировка проверялась сравнением функции распределения  $S_0(z)$ , полученной по результатам измерений датчиками (спыт 1, рис. 2) и эмульсиями<sup>x/</sup>. Как видно на рис. 6, согласие вполне удовлетворительное.

---

<sup>x/</sup> Результаты измерений получены совместно с В.П. Сидориным.

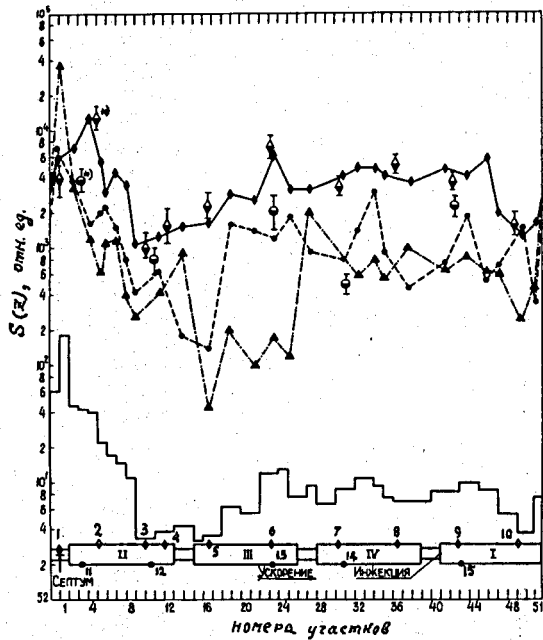


Рис. 6. Сравнение функций распределения вторичных частиц по азимуту синхрофазотрона.  $\blacklozenge$  - измерено эмульсиями К-20 по внутренней стороне камеры;  $\blacklozenge$  - то же системой КПЧ;  $\bullet$  - измерено эмульсиями К-20 по наружной стороне камеры;  $\circ$  - то же системой КПЧ;  $\blacktriangle$  - измерено эмульсиями К-20 наверху камеры;  $\text{---}$  - суммарная функция распределения;  $\ast$  - точки связи функций распределения.

## Результаты эксперимента

С точки зрения радиационных условий за пределами защиты синхрофазотрона представляет интерес получить функцию  $S_c(E'_0, z)$  при  $E'_0 > 1$  Гэв, что соответствует времени 400 мсек.

Средняя величина счёта вторичных частиц

$$\overline{N_{ij\ell}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n N_{ij\ell} \quad , \quad (6)$$

где  $N_{ij\ell}$  - счёт для  $i$ -го датчика в  $j$ -ом измерении для интервала  $\ell$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ). С учётом коэффициентов энергетической и азимутальной градуировки получим:

$$\overline{L}_{i\ell} = \frac{\overline{N}_{ij\ell}}{\overline{a}(E'_\ell) \overline{a}_i(z)} \quad , \quad (7)$$

где  $\overline{a}(E'_\ell)$  взято для середины интервала  $\Delta E'_0$  по экспериментальным данным (рис. 5). На рис. 7 показано временное (энергетическое) распределение потерь протонов, вычисленное по (7) для некоторых точек кольца синхрофазотрона.

Будем считать, что на участке  $\Delta z$ , где стоит  $i$ -ый датчик, функция распределения вторичных частиц равномерная, а сброс на мишень всегда происходит в "м"-ном временном интервале. Тогда можно определить число, пропорциональное потерям протонов в процессе ускорения для  $i$ -го датчика:

$$\Delta \overline{L}_i^{(c)} = a \sum_{e=1}^{m-1} \overline{N}_{ie} \quad . \quad (8)$$

Для всех датчиков, расположенных по азимуту, эта величина равна:

$$\overline{L}_c = \sum_{i=1}^k \Delta z_i \Delta \overline{L}_i^{(c)} \quad . \quad (9)$$



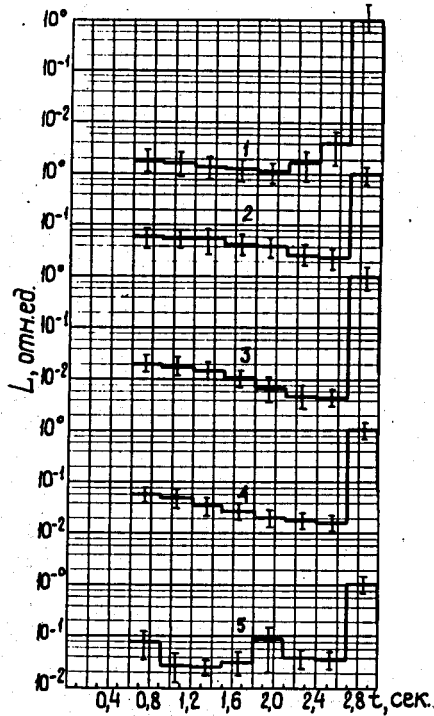


Рис. 7. Временное (энергетическое) распределение потерь протонов. 1 - измерено датчиком №3, (рис. 6); 2 - то же №1; 3 - то же №6; 4 - то же №8; 5 - то же №15.

Соответственно для сброса на мишень:

$$\overline{\Delta L_i^{(m)}} = a_m N_{im} : \quad \overline{L_m} = \sum_{i=1}^k \Delta z_i \overline{\Delta L_i^{(m)}} . \quad (10)$$

Полный интеграл потерь протонов численно равен интенсивности  $I_0'$ , соответствующей времени  $t_0$  (рис. 8):

$$a (\overline{L_m} + \overline{L_c}) = I_0' , \quad a_m = a_c = a . \quad (11)$$

Поскольку величина  $I'_0$  нам неизвестна, запишем выражение (11) через  $\bar{I}_0$ , которая мониторировалась телескопом счётчиков

$$a(\bar{L}_m + \bar{L}_c) = \bar{I}_0(1 + \bar{\chi}). \quad (12)$$

Абсолютное значение потерь протонов (прот/см) можно получить, зная величины потоков  $\Phi_1$  (табл. 2), однако для практических расчётов достаточно знать величину  $\bar{\chi}$  в % от  $\bar{I}_0$ .

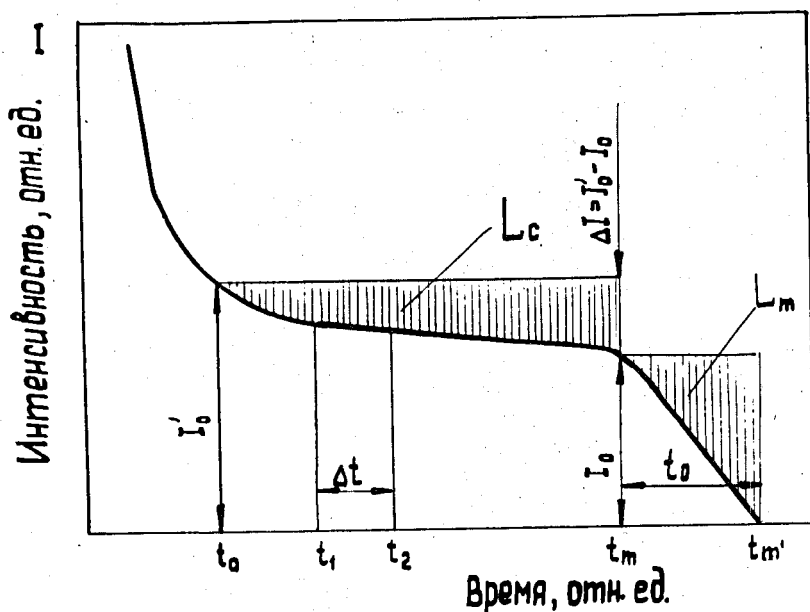


Рис. 8. Схема изменения интенсивности синхрофазотрона от времени.  
 $t_0$  - время начала измерения системой КПЧ;  $t_m$ ,  $t_m'$  - соответственно время начала и конца сброса пучка на формагнит.

На рис. 9 показаны основные результаты эксперимента, полученные по данным измерений в опытах П-1У (рис. 2). Среднеквадратичная ошибка не превышает 20%. Во всех опытах измеряли счёт числа вторичных частиц при сбросе пучка на формагнит при работе перехватчика и без перехватчика. Предварительными опытами было установлено, что максимальное уменьшение потерь в "спокойной области" достигается, когда перехватчик расположен на радиусе - 10 см от равновесной орбиты. Для связи измерений в каждом опыте один из датчиков помещали в одну и ту же точку вблизи септума формагнита.

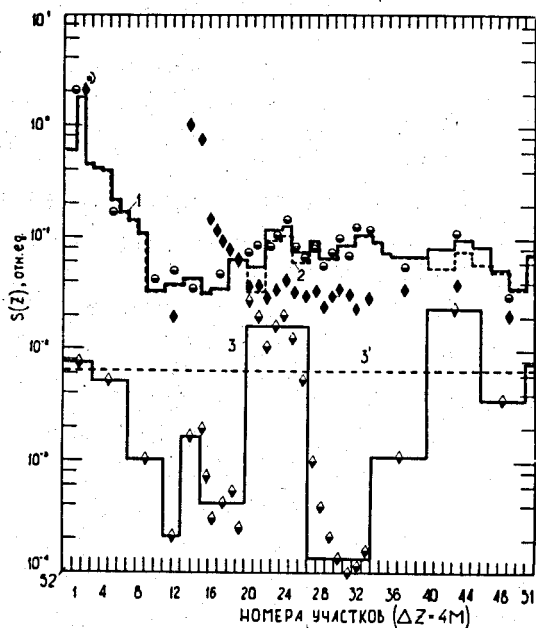


Рис. 9. Функция распределения потерь протонов по азимуту синхрофазотрона. 1 - суммарная функция  $S_0(z)$  (см. рис. 8);  $\bullet$ ,  $\blacklozenge$  - то же по данным измерений системой КПЧ соответственно без перехватчика и с перехватчиком; 2 - функция  $S_m(z)$ ; 3 - функция  $S_c(z)$  измерена в опыте П;  $\blacklozenge$  - то же, по результатам измерений в опытах П-1У (рис. 2); 3 - гипотетическая равномерная функция  $S'_c(z)$ ; x - точки связи функций распределения.

Функция  $S_c(z)$  вначале была измерена при расположении датчиков в опыте II (рис. 2). Результаты показаны в виде гистограммы на рис. 9. Затем на отдельных участках кольца была измерена функция распределения при более частом расположении датчиков по азимуту (опыты III и IV). Кроме того, было установлено, что вид функции  $S_c(z)$  не меняется при различной интенсивности  $2,2 \cdot 10^9$ ;  $7,9 \cdot 10^9$  (стабилизированные) и  $3,3 \cdot 10^{10}$ , причём полные потери протонов в процессе ускорения  $\bar{X}$  соответственно равны: 1,1; 2,2; 12,9%. Для первых двух значений интенсивности величины  $\bar{X}$ , по-видимому, существенно занижены, так как интенсивность стабилизировали до  $t_0 = 0,4$  сек путем обрезания периферийной части сечения пучка. Естественно, что при этом в процессе дальнейшего ускорения терялось меньше протонов, чем могло бы теряться от полного сечения пучка без стабилизации интенсивности. На основе результатов эксперимента были получены функции источников излучения для различных режимов работы синхрофазотрона и рассчитаны радиационные поля в области до 1,5 км от ускорителя (см., например, /10/).

Авторы признательны Л.Р. Кимелю, Б.С. Сычёву и И.Б. Иссинскому за советы, а также А.С. Хрыкину, В.Ф. Таусеневу и А.Л. Шишкину за помощь при подготовке и проведении экспериментов.

#### Литература

1. H.W.Patterson and R.H.Thomas. Particle Accelerators, 2, 77, 1971.
2. W.S.Gilbert et al. UCRL-17941, 1968.
3. Л.Н. Зайцев и др. Препринт ОИЯИ, Р16-6059, Дубна, 1971.
4. В.Г. Головачик и др. Препринт ИФВЭ, ОРЗ 69-114, 1969.
5. G.W.Bennet et al. Particle Accelerators, 2, 251, 1971.
6. Ю.М. Адо, Э.А. Мяс. Атомная энергия, 27, 515, 1969.

7. J. Ranft. Proc. 2nd Int. Conf. on Accelerators Dosimetry and Experience, Sranford, Nov. 5-9, 1969 (CONF-691101).
8. До Ин Себ, ЖЭТФ, 43, 121 (1962).
9. И.К. Взоров. Препринт ОИЯИ, Р1-4442, Дубна, 1969.
10. Л.Н. Зайцев и др. Препринт ОИЯИ, Р16-6185, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 апреля 1972 года.