

объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

1611/2-81

30/III-81

P9-80-865

В.Д.Инкин, А.А.Мозелев, В.П.Саранцев

КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ  
ПО ТОРМОЗНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

*Направлено в ПТЭ*

1980

## ВВЕДЕНИЕ

Для настройки коллективного ускорителя тяжелых ионов /КУТИ/ и проведения физических экспериментов необходимо оперативное измерение чисел электронов  $N_e$  и накопленных ионов  $N_i$  в кольце, желательно в каждом цикле ускорителя, без какого-либо воздействия на электронно-ионное кольцо. Одним из способов решения этой задачи является использование диагностики электронно-ионных колец по тормозному излучению /1,2/.

При взаимодействии электронов кольца с кулоновским полем ядер нейтральных атомов остаточного газа имеет место так называемое тормозное излучение. По интенсивности этого излучения можно определять  $N_e$  /1/.

Накопление ионов происходит при ионизации нейтральных атомов остаточного газа электронным ударом. Ионы удерживаются внутри кольца его электрическим полем, и к концу накопления их становится на 2-3 порядка больше, чем нейтральных атомов. Это позволяет по интенсивности тормозного излучения электронов на конечном этапе сжатия определять  $N_i$  /2/.

В настоящее время на прототипе КУТИ ОИЯИ успешно эксплуатируется система диагностики электронно-ионных колец по тормозному излучению. В работе /3/ была показана возможность использования тормозного излучения электронов для определения  $N_e$ , однако при проведении физических исследований необходима более точная калибровка системы измерения.

В настоящей работе проводится сравнение результатов измерений параметров колец, полученных с помощью системы диагностики по тормозному излучению, со значениями параметров, полученных с помощью других систем диагностики /5,6/, работающих на прототипе КУТИ.

## МЕТОДИКА КАЛИБРОВОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения  $N_e$  тормозное излучение регистрируется под углом  $90^\circ$  к направлению движения электронов /рис. 1/, что соответствует максимальной интенсивности  $\gamma$ -квантов. Зависимость регистрируемой интенсивности от числа электронов определяется по формуле

$$N_\gamma = GN_e n \sum \sigma \epsilon r, \quad /1/$$

где  $G$  - геометрический фактор;  $\sigma$  - интегральное сечение выхода  $\gamma$ -квантов;  $n_{\Sigma}$  - суммарная плотность нейтральных атомов и ионов;  $c$  - скорость света;  $t$  - время измерения. Формула /1/ позволяет производить расчет  $N_e$  по регистрируемому  $N_{\gamma}$ .

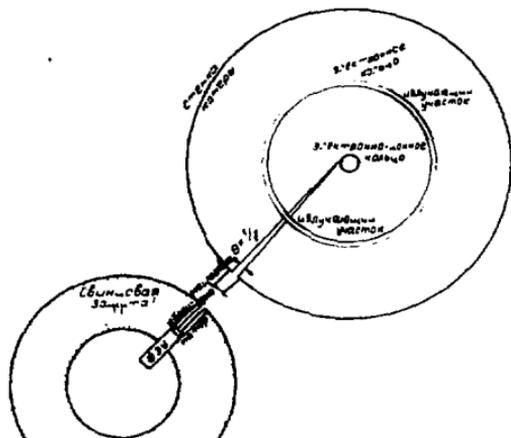


Рис. 1. Геометрия эксперимента.

Тормозное излучение электронов при взаимодействии с ионами на конечных этапах сжатия колец сосредоточено в основном в телесном угле с раствором  $\theta = 1/\gamma$ , что позволяет легко рассчитывать геометрические факторы измерений при известном значении энергии электронов. Регистрируемая интенсивность связана с плотностью ионов в кольце  $n_i$  следующим образом:

$$N'_{\gamma} = GN_e n_i \sigma_i c t, \quad /2/$$

где  $\sigma_i$  - интегральное сечение тормозного излучения электронов при взаимодействии с ионами с учетом эффективности регистрации детектора.

Таким образом, регистрируя тормозное излучение электронов в различные моменты времени, можно определить число электронов и ионов в кольце:

$$N_i = n_i \cdot V,$$

где  $V$  - объем электронно-ионного кольца. Для регистрации тормозного излучения на всех этапах сжатия кольца используется один

детектор без изменения его геометрического положения. Детектором служит фотоэлектронный умножитель/ФЭУ/с кристаллом  $\text{NaJ(Tl)}$ , обеспечивающий эффективность регистрации  $\sim 1$ , так как на начальных этапах сжатия интенсивность тормозного излучения невелика. Данная методика предоставляет возможность измерения  $N_e$  и  $N_j$  на всех этапах сжатия по регистрируемому в различных временных интервалах тормозному излучению.

Для калибровки системы производилась также регистрация тормозного излучения электронов, возникающего при "сбросе" кольца на инфлектор или стенки камеры адгезатора. Измерение интенсивности этого излучения проводилось с помощью ФЭУ, работающего в токовом режиме.

## АППАРАТУРА И ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ

Блок-схема системы диагностики электронно-ионных колец приведена на рис. 2. Детектором излучения является сцинтилляционный блок, представляющий собой фотоумножитель, работающий в счетном режиме с кристаллом  $\text{NaJ(Tl)}$  размерами  $\phi 30 \times 30 \text{ мм}^2$ . Аппаратура системы выполнена в стандарте КАМАК и функционирует на линии с мини-ЭВМ типа ТРА/1. Подробное ее описание дается в работе <sup>1/4/</sup>.

Временная диаграмма измерений приведена на рис. 3. Для того чтобы проводить одновременные измерения  $N_e$  и  $N_j$  в каждом цикле работы ускорителя, был изменен режим его работы - время включения первой ступени системы сжатия колец сдвинуто относительно

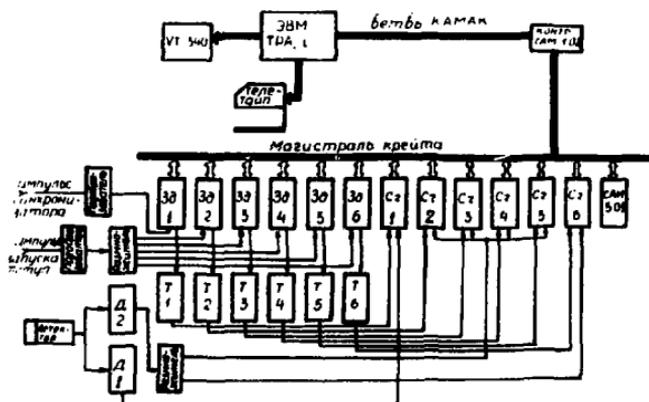


Рис. 2. Блок-схема системы диагностики.

но инъекции на 1,5 мс. Это было сделано для того, чтобы в регистрируемое тормозное излучение при определении  $N_e$  не вносили вклада  $\gamma$ -кванты, возникающие при посадке потерянных в процессе сжатия электронов на стенки камеры. На рис. 3 показано положение во времени стробирующих импульсов счетчиков Сч1 для определения  $N_e$  и Сч2-Сч5 - для определения  $N_i$ .

Алгоритм программы обработки данных приведен на рис. 4, с целью экономии машинной памяти организован цикл обработки  $N_{ij}$  (I). Для каждого  $N_{ij}$  производится вычисление коэффициента  $A(I)$  с целью дальнейшего расчета  $N_e \cdot N_i$ . Измеряемые  $N_e$  и  $N_e \cdot N_i$  записываются в память ЭВМ и выводятся на телетайп. Дальнейшая обработка данных производится следующим образом. Сначала определяются  $M$  и  $D$  - математические ожидания и дисперсии измеряемых величин  $N_e$  и  $N_i(t)$ , где  $t$  - временные интервалы измерений для соответствующих стробирующих импульсов. Корреляционный коэффициент между  $N_e$  и  $N_i(t)$  вычисляется по формуле

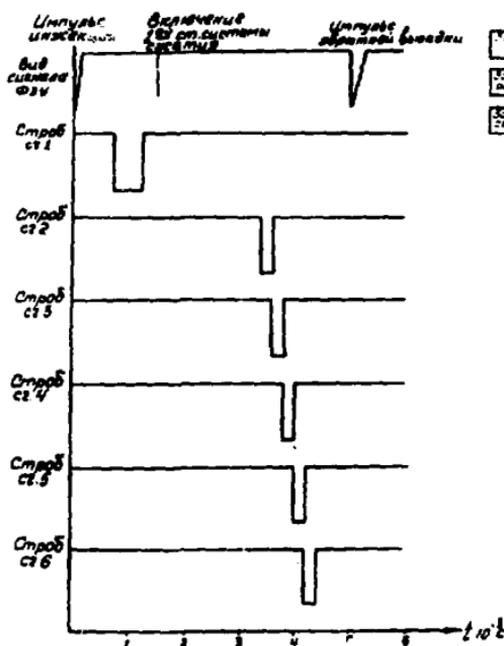


Рис. 3. Временная диаграмма.

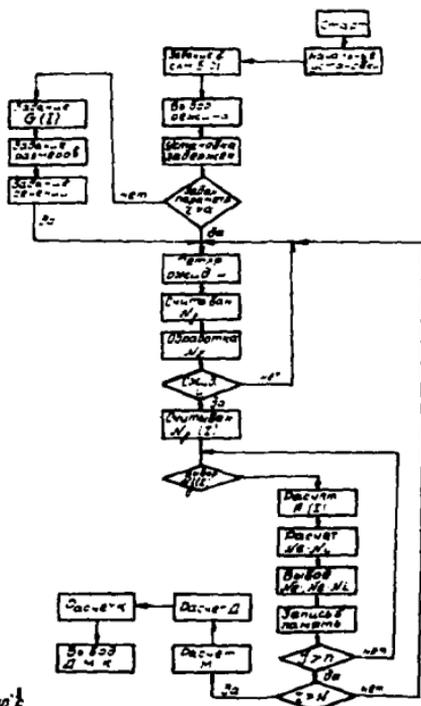


Рис. 4. Алгоритм программы обработки данных.

$$K(N_e, N_i(t)) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (N_{ej} - \bar{N}_e)(N_{ij} - \bar{N}_i)}{\sigma_{N_e} \cdot \sigma_{N_i}}, \quad (3/)$$

где  $\bar{N}_e$  и  $\bar{N}_i$  - математические ожидания;  $\sigma_{N_e}$  и  $\sigma_{N_i}$  - средне-квадратичные отклонения измеряемых величин. Вычисленные значения  $M$ ,  $D$  и  $K(N_e, N_i(t))$  выводятся на телетайп. Программа написана на языке ФОКАЛ "М" и позволяет производить измерение и обработку данных в каждом цикле работы ускорителя.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате калибровки системы диагностики по тормозному излучению был определен корреляционный коэффициент между  $N_e$  и  $U_{y-}$  амплитудой сигнала ФЗУ, регистрирующего тормозное излучение электронов при "сбросе" кольца на инфлектор при спаде поля нулевой ступени системы сжатия адгезатора. Корреляционный коэффициент  $K(N_e, U_{y-})$ , рассчитанный для 50 циклов работы ускорителя, при среднем значении давления в камере адгезатора  $P \sim 7 \cdot 10^{-8}$  Тор составляет  $\sim 0,89$ , что говорит о хорошей точности относительных измерений  $N_e$ .

Для проверки результатов абсолютных измерений проводилось измерение  $N_e$ ,  $N_i(t)$  и  $U_{y-}$  обр. для двадцати циклов ускорителя и обработка результатов по изложенной выше программе. Проводилось несколько серий измерений для различных режимов ускорителя, после чего отбирались серии, для которых  $K(N_e, N_i(t)) \approx 1$ . Для таких серий предполагается отсутствие потерь электронов при сжатии колец. На рис. 5 приведен график зависимости  $N_e(U_{y-} \text{ обр.})$ .

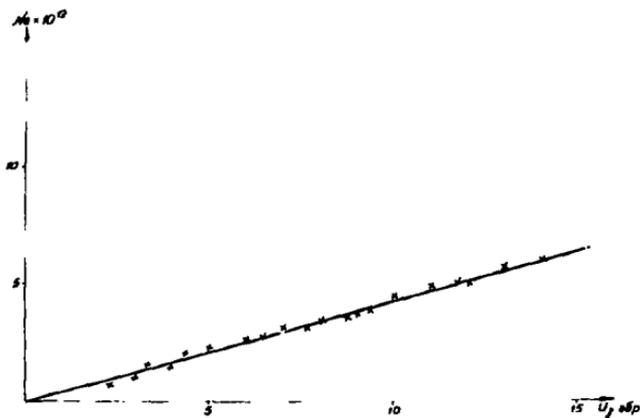


Рис. 5. Зависимость  $N_e(U_{y-} \text{ обр.})$ .

Давление в камере адгезатора при измерениях было равно  $P \approx 1 \cdot 10^{-7}$  Тор. Сравнение этой зависимости с аналогичной для системы диагностики по синхротронному излучению <sup>/5/</sup> дает  $\frac{N_e \text{ торм.}}{N_e \text{ синх.}} \leq 2$ , что согласуется с относительными ошибками

измерения этих систем. Совпадение с результатами, полученными с помощью индукционных датчиков <sup>/6/</sup>, не хуже 20%, что говорит о точности абсолютных измерений  $N_e$ .

Ошибка относительных измерений  $N_e \cdot N_i$  существенно зависит от набранной статистики  $N_\gamma$ . Статистика, в свою очередь, ограничена временными характеристиками системы диагностики и зависит от режима работы ускорителя. Поэтому для измерения  $N_e \cdot N_i$  было подготовлено несколько режимов работы системы диагностики, отличающиеся уровнем амплитудной дискриминации. Таким образом, для каждой настройки подбирается оптимальный режим системы. Значение  $N_\gamma$  выбиралось для временного интервала, соответствующего максимуму накопления ионов, после чего производилась проверка отсутствия просчетов системы. Для этого снималась зависимость  $N_\gamma(E_H)$ , где  $E_H$  - энергия  $\gamma$ -квантов, соответствующая уровню дискриминации. Зависимость сравнивалась с расчетной и, если они совпадали, проводились измерения  $N_e \cdot N_i$ . Если совпадений не было, уровень дискриминации увеличивался. На рис. 6 приведена одна из зависимостей  $N_\gamma(E_H)$ , сплошной линией показана расчетная величина  $N_\gamma$ . Затем для выбранного оптимального режима работы системы проводилось измерение  $N_e \cdot N_i$ .

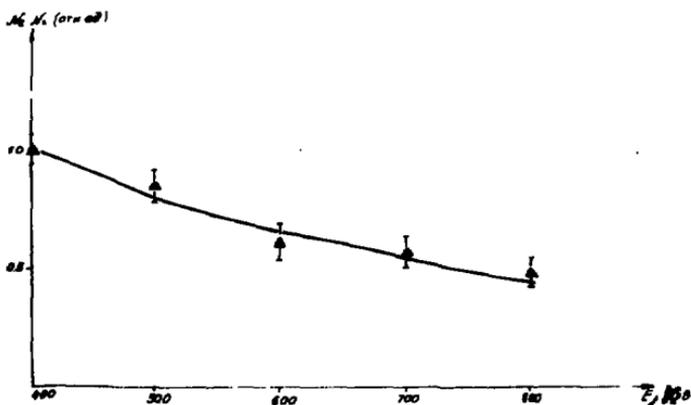


Рис. 6. Зависимость  $N_e \cdot N_i$  от уровня дискриминации системы.

На рис. 7 приводится график зависимости  $N_e \cdot N_i (U_{\gamma \text{обр.}})$ . Значение давления в камере адгезатора в этом случае равно  $P = 7 \cdot 10^{-8}$  Тор, временной интервал измерений соответствует  $t = 2,4$  мс после инъекции. Сплошной линией на этом рисунке показана кривая  $f = U_{\gamma}^2$ .

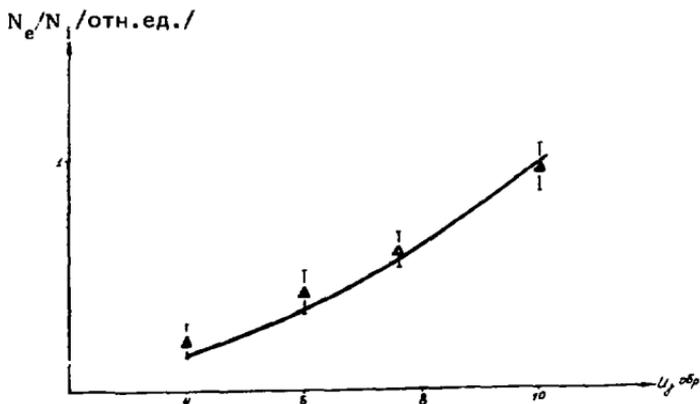


Рис. 7. Зависимость  $N_e \cdot N_i (U_{\gamma \text{обр.}})$ .

Калибровка системы диагностики предоставляет возможность использования ее для измерения параметров электронно-ионных колец на всех этапах сжатия.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.А.Свиридову за полезные советы и обсуждения и Г.В.Долбилову за помощь при выполнении работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инкин В.Д. и др. ОИЯИ, Р9-12726, Дубна, 1979.
2. Инкин В.Д. и др. ОИЯИ, Р9-12940, Дубна, 1980.
3. Инкин В.Д. и др. ОИЯИ, Р9-12725, Дубна, 1979.
4. Инкин В.Д. и др. В кн.: Труды X Международного симпозиума по ядерной электронике. Дрезден, 1980.
5. Беспалова Т.В. и др. ОИЯИ, Р9-11095, Дубна, 1977.
6. Долбилов Г.В. и др. В кн.: Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. ОИЯИ, Д9-10500, Дубна, 1976, с. 57.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 декабря 1980 года.