

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 621.039.6

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

© 1999 г. И. И. Морозов, В. Г. Соколов, М. Ю. Степанов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск-90, просп. Акад. Лаврентьева, 11  
E-mail: morozov@inp.nsk.su; sokolov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.08.98 г.

Описан детектор нейтронов на основе водородсодержащего сцинтиллятора из полистирола, позволяющий измерять потоки нейтронов на детектор в диапазоне  $10^3$ – $2 \cdot 10^5$  нейтронов/с с временным разрешением 4 мс. Работа детектора продемонстрирована в экспериментах на установке АМБАЛ-М и экспериментальном стенде ИК-50 для регистрации потока быстрых нейтронов, образующихся в инжекторном тракте дейтериевого пучка в результате термоядерной реакции  $D^+ + D \rightarrow n + {}^3\text{He}$ .

В настоящее время на различных установках с термоядерной плазмой получают значительные потоки нейтронов. Так, на установке JET достигнута рекордная пиковая термоядерная мощность 13 МВт [1], что соответствует полному потоку нейтронов  $6 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$  с энергией 14 МэВ. На установке TFTR получена мощность синтеза 10.7 МВт [2], что соответствует потоку нейтронов  $4.8 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$ . Регистрация нейтронов является одним из важных диагностических инструментов для исследования параметров плазмы и пучков, использующихся для создания и нагрева плазмы.

В нашей работе нейтронная диагностика применена для исследования многоамперных мегаваттных ионных пучков на установке АМБАЛ-М (открытая амбиполярная ловушка) [3, 4] и экспериментальном стенде ИК-50 [5]. В основе метода диагностики лежит регистрация нейтронов, образующихся в ядерных реакциях синтеза при взаимодействии дейтронов пучка  $D^+$  с атомами D остаточного газа в камере.

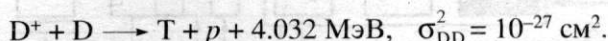
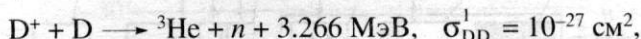
Для регистрации быстрых нейтронов мы использовали водородсодержащий сцинтиллятор из полистирола. Применимость данного метода в нашем случае обусловлена отсутствием высокоэнергетичных заряженных частиц, которые могли бы, как и нейтроны, вызывать сцинтилляции в полистироле, а также значительным ослаблением в металлических стенках вакуумной камеры сопутствующих потоков осколков деления ядерных реакций синтеза ( $p$ ,  $\alpha$ -частиц,  ${}^3\text{He}$ , T), которые также могли бы вызывать сцинтилляции.

На рис. 1 показана схема экспериментального стенда, на котором проводились испытания ионных источников ИК-50 и моделировались условия транспортировки пучков в инжекторных трактах АМБАЛ-М. При работе ионного источника концентрацию газа в камере изменяли от  $5 \cdot 10^{10}$  до

$10^{12} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 2 показана схема линии инжекции концевой пробкотрона установки АМБАЛ-М.

На рис. 1 и 2 показано также расположение детекторов, с помощью которых проводилась диагностика пучков. В качестве дополнительных диагностических инструментов использовалась оптическая диагностика на основе регистрации излучения  $\alpha$ -линии серии Бальмера атомов дейтерия и водорода, а также манометрический преобразователь для измерения концентрации газа в вакуумной камере установки.

При энергии дейтронов пучка  $E = 30 \text{ кэВ}$  с равной вероятностью могут идти два процесса [6]



Обе реакции экзоэнергетичны. Первая ветвь реакции идет с испусканием быстрых нейтронов. При этом энергия, уносимая каждым нейтроном, равна  $E_n = 2.45 \text{ МэВ}$ .

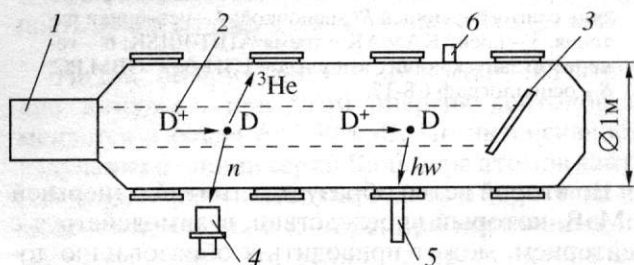


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для испытания источника ИК-50. 1 – ионный источник ИК-50; 2 – ионный пучок; 3 – приемник пучка (титановый лист толщиной 2 мм); 4 – детектор нейтронов; 5 – устройство оптической диагностики; 6 – манометрический преобразователь ПММ-46.

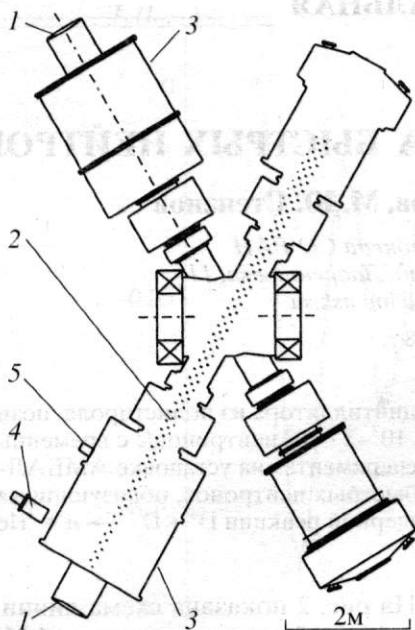


Рис. 2. Схема линии инъекции концевого пробкотрона установки АМБАЛ-М. 1 – ионные источники ИК-50; 2 – ионный пучок; 3 – инжекторные тракты; 4 – детектор нейтронов; 5 – манометрический преобразователь ПММ-46.

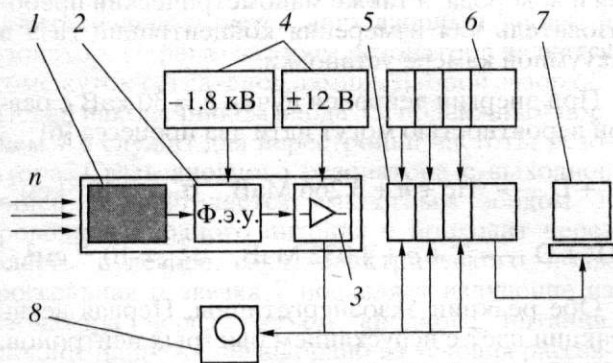
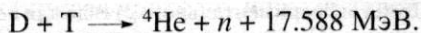


Рис. 3. Схема диагностической системы регистрации нейтронов. 1 – сцинтиллятор из полистирола; 2 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-84; 3 – входной усилитель с интегрирующей RC-цепочкой; 4 – источники питания; 5 – крейт КАМАК с тремя АЦП-101СК; 6 – генератор запускающих импульсов ГЗИ-6; 7 – IBM PC; 8 – осциллограф С8-17.

Во второй ветви образуется тритий с энергией 1 МэВ, который впоследствии, взаимодействуя с дейтерием, может приводить к образованию дополнительных нейтронов в реакции



Сечение этого процесса при энергии бомбардирующих частиц 1 МэВ (в роли которых выступает тритий) составляет  $\sigma_{DT} = 2 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$  [6].

Энергия испускаемых в последней реакции нейтронов  $\approx 14$  МэВ. Вследствие малости концентрации образующегося в пучке трития, вклад таких нейтронов в регистрируемый поток пренебрежимо мал, даже несмотря на большее значение сечения взаимодействия  $\sigma_{DT}$  в сравнении с  $\sigma_{DD}^1$ . Соответствующие оценки приведены в [7].

Поток нейтронов из единицы объема, образованных при взаимодействии пучка с фоновым газом в камере, определяется формулой

$$\dot{N} = nm^+v\sigma, \quad (1)$$

где  $n$  – плотность дейтерия в камере,  $n^+$  – плотность дейтронов  $D^+$ ,  $v$  – их скорость,  $\sigma = \sigma_{DD}^1$  – сечение взаимодействия.

Ток ионного пучка

$$I = en^+vS, \quad (2)$$

где  $S$  – поперечное сечение пучка.

Выразив плотность дейтронов в пучке  $n^+$  из выражения (2) и подставив в (1), получим, что поток нейтронов  $\dot{N}$  пропорционален току пучка  $I$  и концентрации газа в камере  $n$

$$\dot{N} \sim In. \quad (3)$$

Таким образом, измерив поток нейтронов и зная одну из двух величин, можно определить другую – либо ток пучка, либо концентрацию дейтерия в камере.

Регистрация нейтронов происходит по вторичным заряженным частицам – протонам отдачи, образующимся при взаимодействии нейтронов с ядрами водорода [8]. Время высвечивания в полистироле – 2.2 нс, длина волны в максимуме спектра – 400 нм [8]. Детектор представляет собой параллелепипед из полистирола (длина пробега нейтронов  $\sim 5$  см) размерами  $3 \times 20 \times 22$  см со световодом для ф.э.у. Сцинтиллятор обернут алюминиевой фольгой, что увеличивает вероятность регистрации фотонов, а также позволяет исключить паразитную внешнюю засветку. В нашей работе использовался ФЭУ-84 с входным усилителем и интегрирующей RC-цепочкой с  $\tau = 100$  нс.

Схема диагностической системы показана на рис. 3. Для обработки сигнал с ф.э.у. подавался на АЦП-101СК [9] в стандарте КАМАК, далее цифровая осциллограмма считывалась и запоминалась в э.в.м. Для запуска а.ц.п. в определенные моменты времени использовался генератор запускающих импульсов ГЗИ-6. Запуск нескольких а.ц.п. от разных каналов генератора давал возможность измерять потоки нейтронов в различные отрезки времени во время одного импульса пучка. Генератор синхронизирован с моментом поджига дуги в генераторах плазмы источника ИК-50, что соответствует моменту появления пучка.



Запоминающий осциллограф использовался для контроля формы сигнала на выходе сцинтилляционного счетчика нейтронов (рис. 3). На рис. 4 приведены сигналы, наблюдаемые на экране осциллографа.

Характерная осциллограмма, записанная а.ц.п. в ходе измерения в начале импульса пучка на установке АМБАЛ-М, показана на рис. 5. Шум а.ц.п. и усилителя с интегрирующей цепочкой не превышал  $\pm 3$  мВ. Импульсы отрицательной полярности с амплитудой, большей чем шум, и есть сигналы срабатывания счетчика при регистрации нейтронов. АЦП-101SK, используемый в данной работе, имеет память 4 Кслов и позволяет задавать диапазон по времени кванта а.ц.п. 1 мкс, таким образом, полное время измерения составляет 4 мс.

Проведенные расчеты, учитывающие конкретную форму сцинтиллятора, показали слабую зависимость регистрируемого потока от ориентации детектора относительно пучка. Калибровка системы регистрации [7] с использованием плутониевого источника это также подтвердила.

Одно из достоинств нейтронной диагностики – расположение ее средств вне вакуумной камеры, что не требует специальных фланцев и вакуумных вводов. Расположение детектора на стенде ИК-50 показано на рис. 1, расстояние до оси пучка составляло  $\approx 1$  м. Нормаль к грани наибольшей площади направлена вверх. Расстояние от инжектора ИК-50 до детектора вдоль оси пучка  $\approx 1$  м. При таком расположении из-за уменьшения с расстоянием телесного угла эффективно регистрируются нейтроны из области пучка с продольным размером  $\sim 1$  м.

При номинальных параметрах пучка дейтронов  $D^+$  (энергия частицы  $E = 30$  кэВ,  $I = 50$  А, эмиссионные размеры поперечного сечения пучка  $12 \times 24$  см) и при концентрации остаточного газа дейтерия  $n = 10^{12}$  см $^{-3}$  в камере установки ИК-50 (что соответствует давлению в камере в конце импульса) оценочное значение потока нейтронов из единицы объема составляет  $N = 10^3$  см $^{-3}$  с $^{-1}$  [7]. Тогда полный поток регистрируемых нейтронов со всего объема пучка детектором, расположенным на расстоянии 1 м от оси установки ИК-50, в конце импульса пучка составит  $N_n = 6 \cdot 10^4$  с $^{-1}$ . Измеренное значение нейтронного потока в конце импульса  $(8.5 \pm 1.0) \cdot 10^4$  отсчетов/с (с учетом фона детектора) находится в хорошем соответствии с расчетом.

Измеренный фон на экспериментальном стенде ИК-50 с помощью детектора нейтронов в отсутствие пучка дейтронов составил  $(6 \pm 1) \cdot 10^3$  отсчетов/с.

На рис. 6 представлены экспериментальные результаты, полученные на стенде ИК-50. Параметры исследуемого пучка дейтронов:  $I = 50$  А,

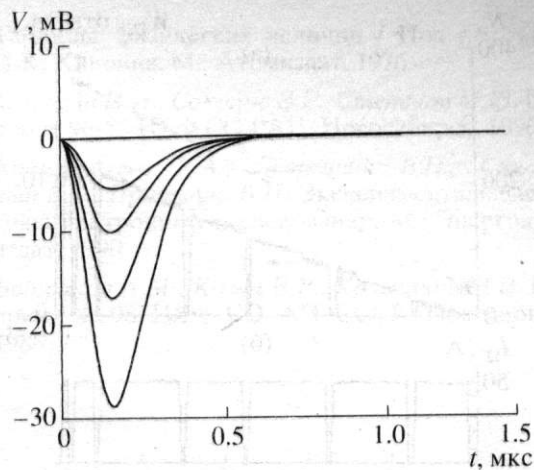


Рис. 4. Сигналы с экрана осциллографа в ходе нейтронных измерений.

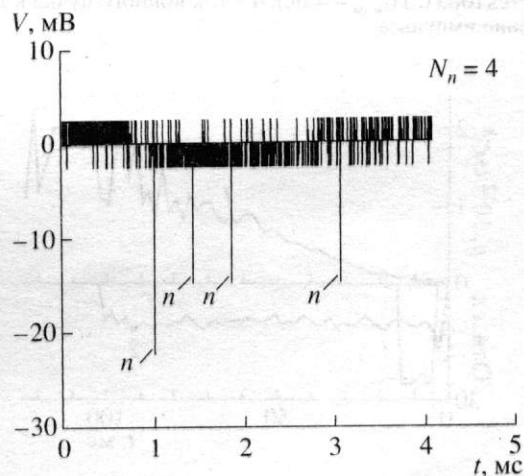


Рис. 5. Характерная осциллограмма, записанная а.ц.п. в ходе нейтронных измерений в начале импульса пучка на установке АМБАЛ-М ( $n$  – импульсы, соответствующие нейтронам).

$E = 30$  кэВ, длительность импульса 100 мс; стабильность пучка по току  $\pm 0.5$  А, по энергии  $\pm 0.3$  кэВ.

На рис. 6б приведен ток ионного пучка в течение импульса, при этом энергия дейтронов не меняется и равна  $E = 30$  кэВ. По интенсивности излучения  $\alpha$ -линии серии Бальмера атомов дейтерия можно дополнительно судить о характере изменения давления в камере; при постоянных параметрах пучка эта величина пропорциональна концентрации газа в вакуумном объеме. На графике видно, что интенсивность свечения  $\alpha$ -линии Бальмера нарастает к концу импульса, что обусловлено нарастанием давления дейтерия в камере. Здесь же приведены данные по нейтронным измерениям. Приведенные значения соответствуют вре-

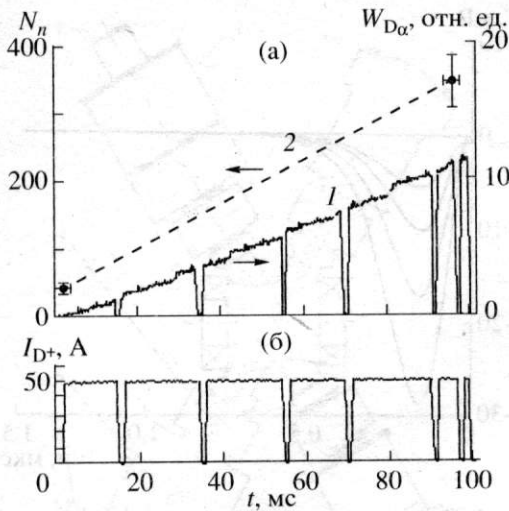


Рис. 6. а – зависимости от времени интенсивности излучения  $\alpha$ -линии серии Бальмера (1) и числа отсчетов детектора (2) ( $t_{\text{изм}} = 4$  мс); б – ток ионного пучка в течение импульса.

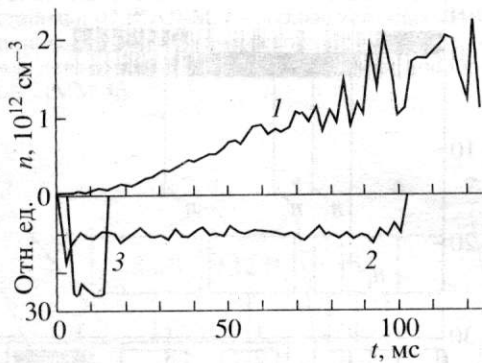


Рис. 7. Зависимость от времени концентрации газа в вакуумном объеме при прохождении ионного пучка через камеру (1); сигналы с клапана в генераторе плазмы источника ИК-50 (2) и с ионно-оптической системы (3).

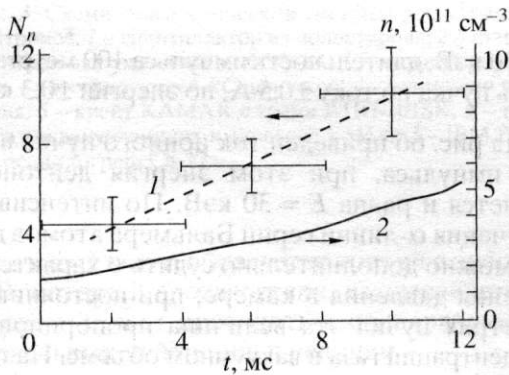


Рис. 8. Число отсчетов детектора в зависимости от времени (1), измеренное на установке АМБАЛ-М ( $t_{\text{изм}} = 4$  мс); зависимость от времени концентрации газа (2) в инжекторном тракте установки АМБАЛ-М при прохождении ионного пучка в линии инжекции.

мени измерения 4 мс, что соответствует нейтронным потокам от  $(9.6 \pm 1.0) \cdot 10^3$  до  $(8.5 \pm 1.0) \cdot 10^4$  отсчетов/с.

Резкие провалы на осциллограммах тока пучка и излучения  $\alpha$ -линии Бальмера обусловлены пробоями в электродной системе ионного источника.

Для исследования динамики газа в вакуумном объеме в процессе работы источника измерялось изменение давления в камере ИК-50 при помощи манометрического преобразователя ПММ-46. Погрешность измерения в рабочем диапазоне давлений составила  $-30\% \dots +50\%$ .

Перед инжекцией пучка концентрация газа в камере была  $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . На рис. 7 приведена зависимость (1) концентрации от времени, отражающая динамику газа в вакуумном объеме во время импульса при прохождении ионного пучка через камеру. Здесь же приведены сигналы с клапана в генераторе плазмы источника ИК-50 (2) и с ионно-оптической системы (3). При длительности импульса 12 мс газ через клапан натекал в течение 102 мс.

Измеренный фон на детекторе нейтронов на установке АМБАЛ-М в отсутствие пучка дейтронов не превышает 350 отсчетов/с.

На рис. 8 представлены результаты нейтронных измерений на установке АМБАЛ-М. Использовался пучок дейтронов:  $I = 42$  А,  $E = 28$  кэВ, длительность импульса 12 мс; стабильность по току  $\pm 4$  А, по энергии  $\pm 0.5$  кэВ. Потоки нейтронов измерялись в различные моменты времени за один импульс. Первое а.ц.п. запускалось в момент поджига дуги в генераторах плазмы, что соответствует моменту появления пучка, второе – с задержкой 4 мс от первого, третье – с задержкой 4 мс от второго. Представленные на рис. 8 значения соответствуют времени измерения 4 мс, что соответствует нейтронным потокам  $(1.1 \pm 0.3) \cdot 10^3$ ,  $(1.7 \pm 0.3) \cdot 10^3$ ,  $(2.5 \pm 0.5) \cdot 10^3$  отсчетов/с.

На рис. 8 приведена также зависимость от времени концентрации газа в инжекторном тракте установки АМБАЛ-М в течение импульса при прохождении ионного пучка в линии инжекции.

Систематическая погрешность измерений, связанная с нестабильностью работы системы питания источника и системы напуска газа, не превосходит 10%. Основная погрешность измерений обусловлена небольшим числом нейтронов, регистрируемых за одно измерение.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-02-17815).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [www.jet.uk/News/oct97news.html](http://www.jet.uk/News/oct97news.html)
2. [www.pppl.gov/oview/pages/TFTR\\_MajorAccomp.html](http://www.pppl.gov/oview/pages/TFTR_MajorAccomp.html)
3. Ахметов Т.Д., Белкин В.С., Бендер Е.Д. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 11. С. 988.
4. Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Савкин В.Я. Препринт 89-163 ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1989.
5. Dimov G.I., Morozov I.I. // Rev. Sci. Instrum. 1990. №1(II). P. 401.
6. Таблицы физических величин / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
7. Морозов И.И., Соколов В.Г., Степанов М.Ю. Препринт 96-55 ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 1996.
8. Крамер-Агеев Е.А., Лавренчик В.Н., Самосадный В.Т., Протасов В.П. Экспериментальные методы нейтронных исследований. М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Батраков А.М., Козак В.Р., Круglyаков М.Э. Препринт 88-98 ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1988.