

УДК 621.039

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ИНЖЕКТОРНОМ ТРАКТЕ ИК-50 УСТАНОВКИ "АМБАЛ-М"

*И. И. Морозов, В. Г. Соколов, М. Ю. Степанов*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Ведется подготовка к использованию интенсивных пучков быстрых атомов дейтерия для нагрева и поддержания плазмы в концевых пробкотронах установки "Амбал-М". В данной работе проведены измерения нейтронных потоков, образующихся в реакциях синтеза в результате взаимодействия дейтонов пучка с атомами остаточного газа дейтерия в камере при прохождении ионного пучка через инжекторный тракт. Измеренные величины нейтронных потоков находятся в хорошем соответствии с расчетами. Предложенная методика регистрации нейтронов успешно используется в качестве мониторинга мощного дейтериевого пучка в инжекторном тракте.*

В экспериментах с термоядерной плазмой на различных установках получают значительные потоки нейтронов. Так, на установке JET впервые была достигнута термоядерная мощность  $\approx 10$  МВт [1], что соответствует полному потоку нейтронов  $\approx 4 \cdot 10^{18}$  с<sup>-1</sup> с энергией 14 МэВ. На установке TFTR получена мощность синтеза 10,7 МВт [2]. На установке JT-60U достигнута рекордная термоядерная мощность 14,7 МВт [3], что соответствует полному потоку нейтронов  $5,2 \cdot 10^{18}$  с<sup>-1</sup> с энергией 14 МэВ. С ростом энергии ионов регистрация нейтронов становится одним из важных диагностических инструментов для исследования параметров плазмы и пучков, использующихся для создания и нагрева плазмы.

В данной работе нейтронная диагностика применена для исследования многоамперных мегаваттных ионных пучков дейтерия. Исследована динамика генерации нейтронов, образующихся в инжекторном тракте ИК-50 установки "Амбал-М" [4] при прохождении пучка дейтонов через инжекторный тракт. Диагностика подготовлена для регистрации нейтронов в экспериментах с высокотемпературной дейтериевой плазмой.

Измерения нейтронных потоков проводились как на концевом пробкотроне установки "Амбал-М", так и на экспериментальном стенде ИК-50 [5]. На рис. 1 и 2 показаны схемы обеих установок с расположением детектора, с помощью которого осуществлялась диагностика. В качестве дополнительных диагностических инструментов использовались 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. На экспериментальном стенде ИК-50 проводятся испытания ионных источников и моделирование условий транспортировки пучков в инжекторных трактах "Амбал-М".

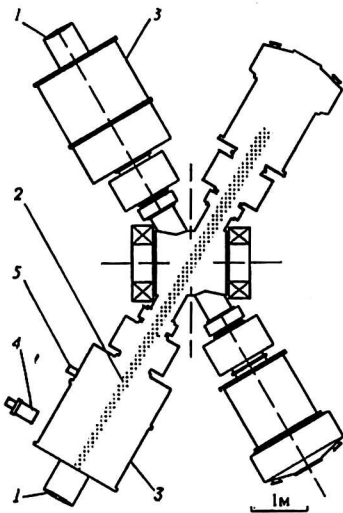


Рис. 1. Схема линии инжекции концевого пробкотрона установки "Амбал-М":  
1 — ионные источники ИК-50; 2 — ионный пучок;  
3 — инжекторные тракты; 4 — детектор нейтронов;  
5 — манометрический преобразователь ПММ-46

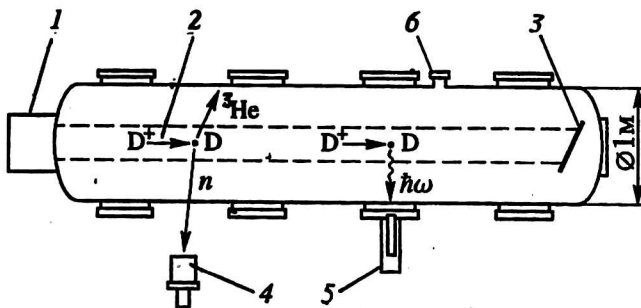
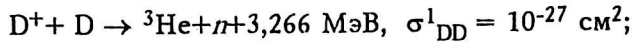
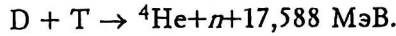


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для испытания источника ИК-50 :  
1 — ионный источник ИК-50; 2 — ионный пучок; 3 — приемник пучка (титановый лист толщиной 2 мм);  
4 — детектор нейтронов; 5 — устройство оптической диагностики;  
6 — манометрический преобразователь ПММ-46

В основе метода диагностики лежит регистрация нейтронов, образующихся в реакциях синтеза при взаимодействии дейтонов пучка  $D^+$  с атомами  $D$  остаточного газа в камере. При энергии дейтонов пучка  $E = 30$  кэВ с равной вероятностью могут идти следующие два процесса [6]:



Первая ветвь реакции идет с испусканием нейтронов. При этом энергия, уносимая каждым нейтроном,  $E_n = 2,45$  МэВ. Во второй ветви образуется тритий с энергией 1 МэВ. Тритий, взаимодействуя с дейтерием, может приводить к образованию дополнительных нейтронов с энергией 14 МэВ 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]. Из-за 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  $N$  пропорционален току пучка  $I$  и концентрации газа в камере  $n$

$$N \sim In.$$

Измерив поток нейтронов и зная одну из двух величин, можно определить другую, т. е. либо ток пучка, либо концентрацию дейтерия в камере. При постоянных параметрах пучка поток нейтронов пропорционален концентрации остаточного газа в камере.

Для регистрации быстрых нейтронов мы использовали водородсодержащий сцинтиллятор из полистирола. 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]. 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.

Схема диагностической системы показана на рис. 3. Детектор представляет собой параллелепипед из полистирола со световодом для ФЭУ. Полистирол покрыт майларовой пленкой, что увеличивает вероятность регистрации фотонов и исключает паразитную внешнюю засветку. Использовался ФЭУ-84 с входным усилителем и интегрирующей RC-цепочкой с  $\tau = 100$  нс.

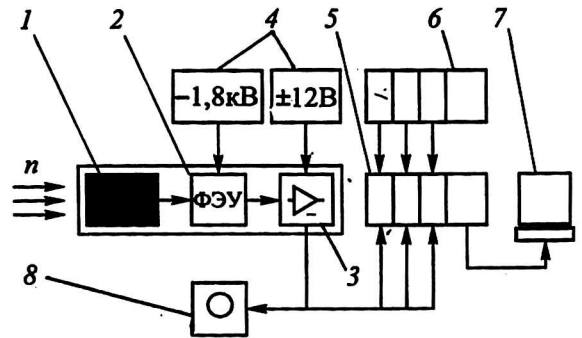


Рис. 3. Схема диагностической системы регистрации нейтронов:

- 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

Сигнал с ФЭУ подавался на цифровой осциллограф АЦП-101SK [9] в стандарте КАМАК. Использование цифрового осциллографа имеет ряд преимуществ: пересчетное устройство и энергоанализатор соединены в одном блоке; осциллографирование позволяет анализировать формы импульсов и различать сигналы от разных частиц. Анализ энергий здесь подразумевает различие нейтронов компонент с разными энергиями, например с энергиями 2 и 14 МэВ.

Для запуска цифрового осциллографа в определенные моменты времени использовался генератор запускающих импульсов ГЗИ-6. Генератор синхронизован с моментом поджига дуги в генераторах плазмы источника ИК-50, что соответствует моменту появления пучка. Подробно детектор нейтронов и диагностическая система описаны в работе [10].

Одно из достоинств нейтронной диагностики — ее расположение вне вакуумной камеры, что не требует специальных вакуумных портов. Диагностика бесконтактная, поскольку исследование квазистационарного пучка мегаваттной мощности контактными методами затруднительно из-за больших тепловых нагрузок. Расположение детектора на стенде ИК-50 показано на рис. 2. Расстояние до оси пучка составляло  $\cong 1$  м, нормаль к грани наибольшей площади направлена вверх, расстояние от инжектора ИК-50 до детектора вдоль оси пучка  $\cong 1$  м. При таком расположении из-за уменьшения с расстоянием телесного угла эффективно регистрируются нейтроны из области пучка с продольным размером  $\sim 1$  м. Проведенные расчеты, учитывающие конкретную форму сцинтиллятора, показывают слабую зависимость регистрируемого потока от пространственной ориентации детектора и пучка. Калибровка системы регистрации это также подтвердила.

Детектор был откалиброван с использованием эталонного плутониевого источника с бериллиевым конвертором, который испускал  $2,23 \cdot 10^5$  нейтронов/с. К достоинствам Pu—Be-источников можно отнести их стабильность и малый выход сопутствующего  $\gamma$ -излучения. Средняя энергия испущенных нейтронов — 4,3 МэВ, присутствует пик около 2,5 МэВ [8]. В процессе калибровки измерялся поток нейтронов при различных углах ориентации источника относительно детектора для фиксированного расстояния 1 м. При этом было зарегистрировано  $(7 \pm 2) \cdot 10^4$  отсчетов/с.

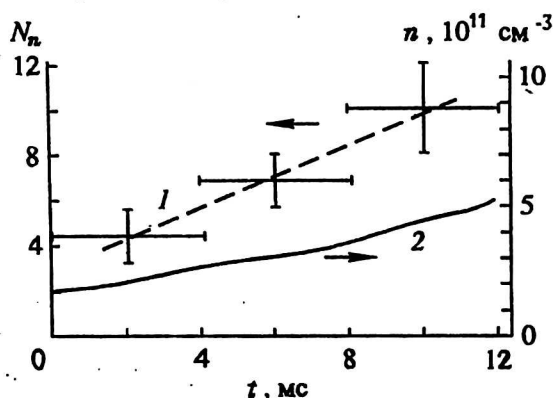
При номинальных параметрах пучка дейтонов  $D^+$  (энергия частицы  $E = 30$  кэВ, ток пучка  $I = 50$  А, эмиссионные размеры поперечного сечения пучка  $12 \times 24$  см) и концентрации остаточного газа дейтерия в камере  $n = 10^{12}$  см $^{-3}$  (что соответствует давлению в камере установки ИК-50 в конце импульса) оценочное значение потока нейтронов из единицы объема составляет  $N = 10^3$  см $^{-3} \cdot$ 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 с помощью детектора нейтронов на установке “Амбал-М” в отсутствие пучка дейтонов не превышает 350 отсчетов/с.

На рис. 4 представлены результаты нейтронных измерений на установке “Амбал-М”, отражающие динамику генерации нейтронов при прохождении пучка через остаточный газ в инжекторном тракте. Использовался пучок дейтонов с током  $I = 42$  А, энергией  $E = 28$  кэВ и длительностью импульса 12 мс, при этом стабильность по току составляет  $\pm 4$  А, по энергии —  $\pm 0,5$  кэВ. Используя несколько цифровых осциллографов, были измерены потоки нейтронов в тече-

ние одного импульса пучка в различные моменты времени с интервалами 4 мс. Первый цифровой осциллограф запускался в момент поджига дуги в генераторах плазмы, что соответствует моменту появления пучка, второй — с задержкой 4 мс от первого, третий — с задержкой 4 мс от второго. Представленные на графике значения соответствуют времени измерения 4 мс, что соответствует нейтронным потокам:  $(1,1 \pm 0,3) \cdot 10^3$ ,  $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^3$  и  $(2,5 \pm 0,5) \cdot 10^3$  отсчетов/с, соответственно. Наблюдается рост числа нейтронов к концу импульса пучка, что обусловлено нарастанием давления дейтерия в камере.

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



На рис. 4 приведена также зависимость концентрации от времени, отражающая динамику газа в инжекторном тракте установки "Амбал-М" в течение всего импульса при прохождении ионного пучка в линии инжекции. Измерения проводились манометрическим преобразователем ПММ-46. Погрешность измерений в диапазоне интересующих нас давлений находилась в пределах от -30 до +50 %.

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

На рис. 5 представлены экспериментальные результаты, полученные на стенде ИК-50. Параметры исследуемого пучка дейтронов: ток  $I = 50$  А, энергия  $E = 30$  кэВ, длительность импульса 100 мс; стабильность пучка по току  $\pm 0,5$  А, по энергии  $\pm 0,3$  кэВ.

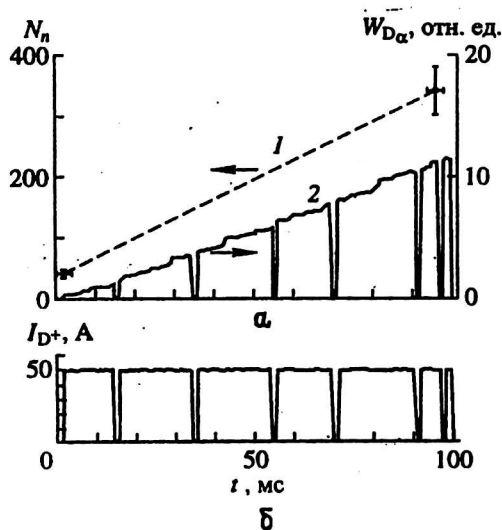


Рис. 5. Зависимости числа отсчетов детектора (1) ( $t_{\text{изм}} = 4$  мс) и интенсивности излучения  $\alpha$ -линии серии Бальмера (2) от времени, измеренные на экспериментальном стенде ИК-50 (а); ток ионного пучка в течение импульса (б)

Данные по нейтронным измерениям приведены на рис. 5, а. Наблюдается рост числа нейтронов к концу импульса пучка. Приведенные на графике значения соответствуют времени 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. Здесь же 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. Из графика видно, что интенсивность свечения  $\alpha$ -линии серии Бальмера нарастает к концу импульса, что обусловлено нарастанием давления дейтерия в камере. На рис. 5, б приведен ток ионного пучка в течение импульса, при этом энергия дейтонов не меняется и равна  $E = 30$  кэВ. Резкие провалы на осциллограммах тока пучка и излучения  $\alpha$ -линии серии Бальмера соответствуют выключениям ионного источника на время 0,2—0,8 мс при пробоях в ионно-оптической системе.

Кроме того, в процессе работы источника контролировался сигнал изменения давления в камере экспериментальной установки ИК-50 с помощью манометрического преобразователя ПММ-46, расположение которого показано на рис. 2. На рис. 6 приведена зависимость концентрации от времени, отражающая динамику газа в вакуумном объеме в течение всего импульса при прохождении ионного пучка через камеру. Перед инжекцией пучка концентрация газа в камере составляла  $5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

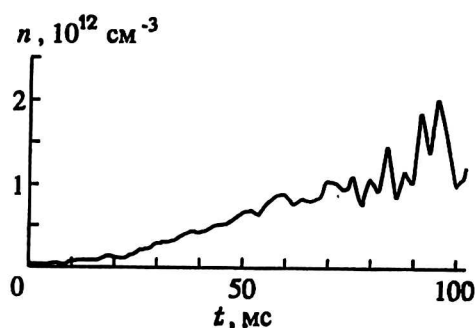


Рис. 6. Зависимость от времени концентрации газа в вакуумном объеме стэнда ИК-50 при прохождении ионного пучка через камеру

Систематическая погрешность измерений, связанная с нестабильностью работы системы питания источника и системы газонапуска, не превосходит 10 %. Основная погрешность измерений обусловлена небольшим числом нейтронов, регистрируемых за одно измерение. Эта погрешность может быть уменьшена за счет набора статистики за несколько сотен импульсов ионного источника.

Таким образом, исследована динамика генерации нейтронов, образующихся в инжекторном тракте ИК-50 установки "Амбал-М" при прохождении пучка дейтонов через инжекторный тракт. В проведенных экспериментах наблюдается рост числа нейтронов к концу импульса пучка, что обусловлено нарастанием давления дейтерия в камере. Результаты показывают, что нейтронные измерения могут успешно применяться в качестве важного диагностического инструмента в сочетании с дополнительными диагностиками для исследования мощного дейтериевого пучка, а также для исследования высокотемпературной дейтериевой плазмы.

Представленная диагностическая система позволяет измерять потоки нейтронов в диапазоне от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^5$  нейтронов/с с временем измерения 4 мс. Для

описываемых экспериментальных условий это соответствует току ионного пучка от 1 до 150 А при концентрации дейтерия в тракте  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>.

### Литература

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. [www-jt60.naka.jaeri.go.jp/html/rep46.htm](http://www-jt60.naka.jaeri.go.jp/html/rep46.htm).
4. Akhmetov T. D., Belkin V. S., Bender E. D. et al // Transactions of Fusion technology, 1999. V. 35. № 1T. P. 94—98.
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., Кругляков М. Э. // Препринт 88-98/ИЯФ СО АН СССР. — Новосибирск, 1988.
10. Морозов И. И., Соколов В. Г., Степанов М. Ю. // Приборы и техника эксперимента, 1999. № 2. С. 95—99.

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

## RESEARCH OF DYNAMICS AND GENERATION OF NEUTRON FORMED IN THE IR-50 INJECTOR TRACT OF "AMBAL-M" INSTALLATION

*I. I. Morozov, V. G. Sokolov, M. Yu. Stepanov*

The Budker's institute for nuclear physics  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of sciences, Novosibirsk, Russia

*Now preparation for usage of intensive beams of prompt deuterium atoms for a heating and maintenance of plasma in trailer mirror machines of the "Ambal-M" installation is carried on. In sectional operation measurings neutron fluxes generated in fusion reactions as a result of interaction deutons of a beam with atoms of residual gas of deuterium in the cabinet at passage of an ion beam through an injector channel are conducted. The measured quantities of neutron fluxes are in good conformity with calculations. The offered procedure of recording of neutrons will successfully be utilized as monitoring powerful of a deuterium bundle in an injector channel.*