

## МОНИТОР ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО СЧЕТЧИКА

В. И. Алексеев, В. А. Басков, О. Д. Далькаров, А. В. Кольцов, А. И. Львов,  
И. А. Мамонов, Л. Н. Павлюченко, В. В. Полянский

*Описана конструкция быстрого монитора релятивистского электронного пучка на основе черенковского счетчика, способного определять интенсивность в диапазоне  $10^6 - 10^{11}$  электрон/сек.*

**Ключевые слова:** черенковский счетчик, электронный пучок, интенсивность пучка.

В связи с задачей создания магнитооптического канала транспортировки высокоинтенсивного релятивистского электронного пучка (100–500 МэВ), выведенного из синхротрона С-253 “Пахра” Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) в экспериментальный зал, требуется монитор, который должен контролировать в режиме on-line интенсивность пучка на всех этапах его транспортировки от ускорителя до рабочего места в экспериментальном зале.

В качестве такого монитора планируется использовать черенковский детектор той же конструкции, которая уже применялась в эксперименте ФИАН [1] по исследованию процесса низкоэнергетического электрорасщепления дейтрона и генерации нейтронов в дейтерированных мишенях-фольгах титана и палладия. Целью эксперимента был поиск влияния кристаллического окружения дейтерия на протекание ядерной реакции  $ed \rightarrow enp$ , происходящей под действием виртуальных фотонов электронного пучка с энергией 7 МэВ от микротрона-инжектора синхротрона С-25Р.

Экспериментальных данных, связанных с исследованием появления нейтронов под действием низкоэнергетических электронных, ионных пучков и электрических разрядов, до сих пор недостаточно, хотя, например, имеются данные о генерации вспышек нейтронов под действием высоковольтных атмосферных разрядов, в которых играют роль как ионные, так и электронные потоки относительно невысоких энергий [2]. Однако интерпретация подобных данных не вполне однозначна [3, 4], и дальнейшие исследования продолжаются (см., напр., [5]).

В настоящей статье описана конструкция и основные характеристики модернизированного монитора, использовавшегося в эксперименте ФИАН [1] и запланированного к использованию в дальнейшем.

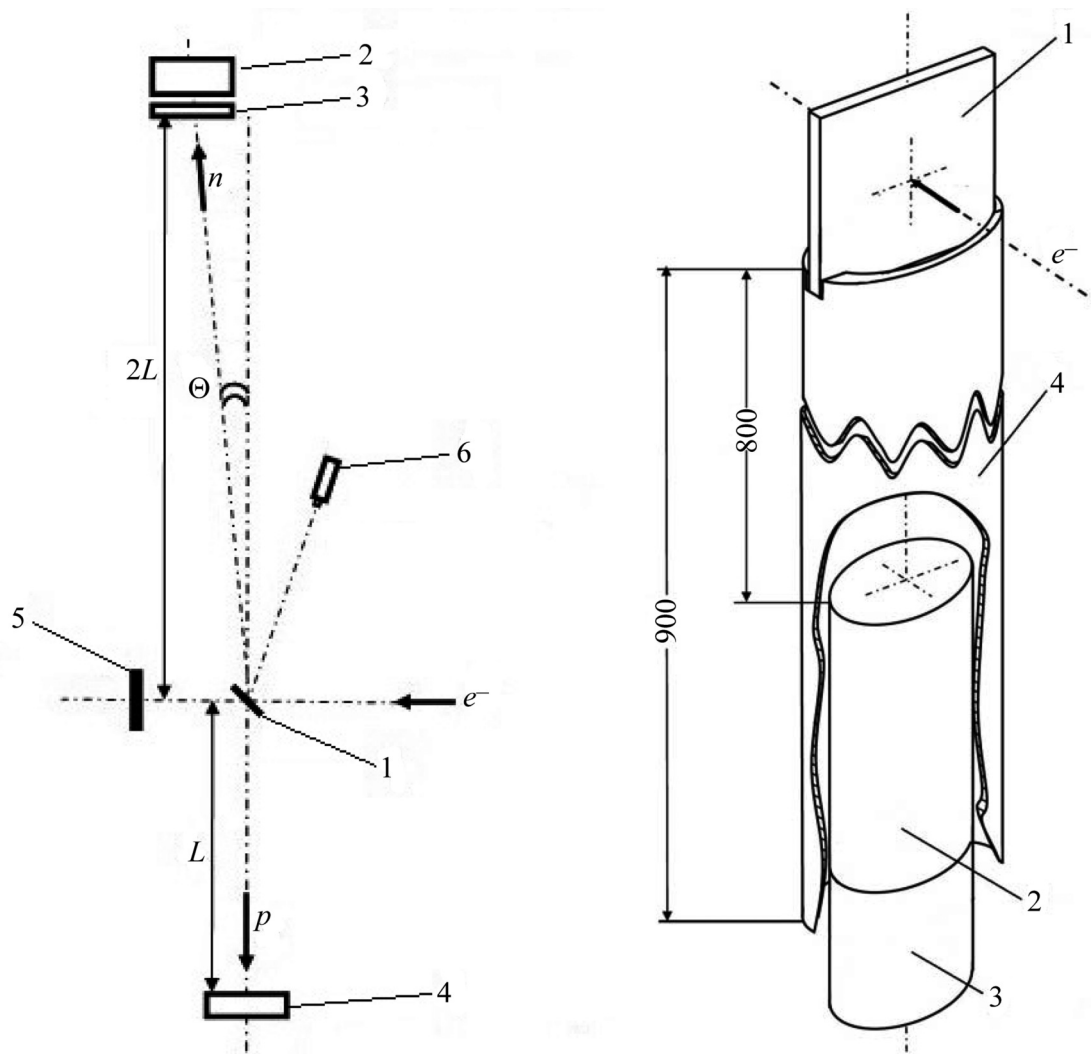


Рис. 1: Схема экспериментальной установки по исследованию процесса электрорасщепления дейтрона в дейтерированных мишенях (вид сбоку): 1 – мишень; 2 – нейтронный детектор; 3 – сцинтилляционный счетчик антисовпадений; 4 – детектор протонов; 5 – черенковский монитор; 6 – видеомонитор. Расстояние от дейтерированной мишени до счетчиков протонного плеча  $L = 100$  см.

Рис. 2: Схема черенковского монитора: 1 – радиатор; 2 – ФЭУ-85; 3 – делитель напряжений; 4 – корпус.

Схема экспериментальной установки [1] представлена на рис. 1. Установка состояла из двух плеч, располагавшихся в вертикальной плоскости перпендикулярно горизонтальной плоскости орбит электронов в микротроне. Детектор верхнего плеча (2, 3) регистрировал нейтроны (нейтронное плечо), детектор нижнего плеча (4) регистрировал протоны (протонное плечо). Видеомонитор (6) обеспечивал контроль состояния мишени (1) и её положения относительно электронного пучка.

Важнейшим элементом установки являлся монитор (5), предназначенный для определения “текущей” интенсивности электронного пучка на экспериментальной мишени, как в момент одновременного появления сигналов в обоих плечах установки, так и суммарной интенсивности за время набора экспериментальной статистики. Монитор располагался на оси электронного пучка за мишенью с целью снизить его загрузку. Кроме того, расположение монитора до экспериментальной мишени нецелесообразно, поскольку наличие вещества на пути низкоэнергетического пучка сильно ухудшает его пространственные и энергетические характеристики.

Первоначально в качестве монитора использовался цилиндр Фарадея диаметром 7 см и длиной 12 см. Однако работа экспериментальной установки при различных интенсивностях пучка электронов ( $10^{10}$ – $10^{12}$  электрон/сек) показала значительную фоновую загрузку обоих плеч, обусловленную, в том числе, массивным цилиндром Фарадея, находящимся в зоне прямой видимости детекторов нейтронов и протонов. Несмотря на то, что детекторы обоих плеч установки находились в защитных свинцовых боксах, фотоэлектронные умножители (ФЭУ-85) детекторов установки практически работали в токовом режиме, амплитуды сигналов счетчиков достигали величины более 1 В по осциллографу. (Входное сопротивление осциллографа 1 МОм.) Поэтому было решено заменить монитор на основе цилиндра Фарадея на детектор с существенно меньшим содержанием вещества.

В качестве монитора был предложен, а в дальнейшем создан и использован счетчик на основе регистрации черенковского излучения, генерируемого электронами пучка при прохождении через тонкий стеклянный радиатор [6]. Особенности применения черенковского счетчика для данной задачи являлись наличие небольшого количества вещества, хорошее быстрое действие детектора, необходимое при высоких интенсивностях пучка, и самое важное – пропорциональная зависимость числа черенковских фотонов от числа прошедших через счетчик электронов.

Монитор располагался в 40 см по пучку от экспериментальной мишени, находящейся в вакуумной камере, сразу за алюминиевой фольгой выходного фланца толщиной

50 мкм, отделяющего вакуумный объём канала от атмосферы (рис. 1). Размеры радиатора составляли  $45 \times 45 \times 1.2$  мм<sup>3</sup> (рис. 2). Через воздушный промежуток 80 см свет от радиатора попадал на фотокатод ФЭУ-85. Радиатор помещался на верхнем конце алюминиевой трубы, а ФЭУ вместе со стандартным делителем находились в трубе на её нижнем конце. Чтобы исключить попадание внешнего света, радиатор был обёрнут алюминиевой фольгой толщиной 30 мкм. ФЭУ, находящийся на нижнем конце монитора, регистрировал “прямой” черенковский свет, выходящий из стеклянного радиатора. Для исключения перегрузок ФЭУ, связанных с регистрацией отражений светового потока стенками корпуса, внутренняя сторона корпуса монитора была покрыта черной бумагой.

Для защиты ФЭУ и делителя от низкоэнергетического фона гамма-квантов во время работы микротрона ФЭУ с делителем были помещены в свинцовый бокс.

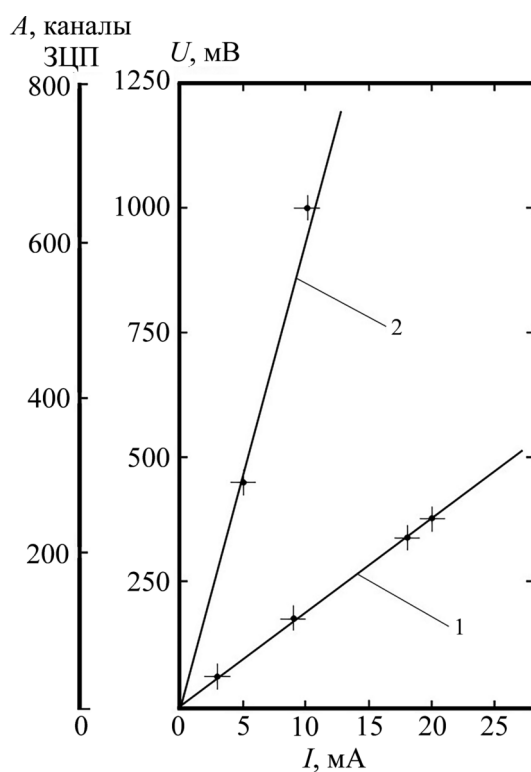


Рис. 3: Зависимость амплитуды сигнала с черенковского монитора от интенсивности выведенного пучка электронов 7 МэВ (1 –  $U_1 = 750$  В; 2 –  $U_2 = 980$  В).

Калибровка монитора в зависимости от интенсивности была проведена для двух напряжений на делителе ФЭУ  $U_1 = 750$  В и  $U_2 = 980$  В при наличии экспериментальной мишени перед монитором (рис. 3). В дальнейшей работе использовалась ка-

либровка при  $U = U_2 = 980$  В. Суть калибровки и последующего мониторинга пучка заключалась в сопоставлении амплитуды сигнала монитора с интенсивностью электронного пучка. Интенсивность электронного пучка, определяемая аппаратурой контроля и управления микротроном, сопоставлялась амплитуде сигнала с черенковского монитора, измеряемой как с помощью осциллографа визуально в единицах [мВ], так и в каналах ЗЦП (ЗЦП – зарядо-цифровой преобразователь). Поскольку сигнал с монитора пропорционален интенсивности электронного пучка, это дало возможность контролировать интенсивность пучка на экспериментальной мишени.

При работе экспериментальной установки триггером события, по которому в память компьютера происходила запись данных с монитора, являлось совпадение сигналов плеч установки и синхроимпульса, вырабатываемого системой вывода электронного пучка из микротрона, триггер  $T = (C_n \cdot C_p) \cdot S$  ( $C_n$  и  $C_p$  – сигналы с одного из счетчиков нейтронного плеча и сигнал со счетчика протонного плеча, соответственно;  $S$  – синхроимпульс). Триггерный сигнал  $T$  подавался на электронный блок “ворота”, который вырабатывал сигнал “старт” длительностью 100 нсек для запуска блока ЗЦП, с помощью которого через крейт-контролер системы КАМАК производилась “запись” цифрового сигнала с монитора в память компьютера.

Надо отметить, что в работе использовался ЗЦП с диапазоном рабочей шкалы 1024 канала. Сигналы с монитора на вход ЗЦП подавались через ослабитель с уровнем ослабления в 10 db, чтобы максимальная величина амплитуды, соответствующая рабочей интенсивности микротрона  $\sim 3$  мА ( $\sim 10^{10}$  электрон/сек), находились в диапазоне  $\sim 200$  канала. Это было сделано для того, чтобы при неуправляемом повышении интенсивности микротрона (более  $\sim 5 \cdot 10^{11}$  электрон/сек) блок ЗЦП не вышел из строя.

На рис. 4 представлена гистограмма амплитуды сигналов монитора или спектр изменения интенсивности микротрона за 7 часов его работы. Видно, что при рабочем напряжении на делителе ФЭУ монитора  $U = 980$  В диапазон изменения интенсивности микротрона составил от  $\sim 1$  до  $\sim 11$  мА или от  $\sim 5 \cdot 10^9$  до  $\sim 2.2 \cdot 10^{10}$  электрон/сек. Средняя интенсивность пучка составила  $\sim 3$  мА или  $\sim 10^{10}$  электрон/сек.

Стекло с примерным составом  $\text{SiO}_2$  (71.8%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2.0%),  $\text{MgO}$  (4.1%),  $\text{CaO}$  (6.7%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (14.8%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.1%),  $\text{SO}_3$  (0.5%) имеет показатель преломления  $n \approx 1.52$  и  $Z = 10.2$ . Оценка числа фотонов на единицу пути пропорциональна квадрату среднего  $Z$  вещества радиатора и для стекла составляет  $N_{\text{чф}} \approx 4500$  фотон/см [7]. Для данного радиатора толщиной 1.2 мм и потока электронов  $\sim 10^{10}$  электрон/сек число черенковских фотонов составляет  $N_{1,2} \sim 5.4 \cdot 10^{12}$ .

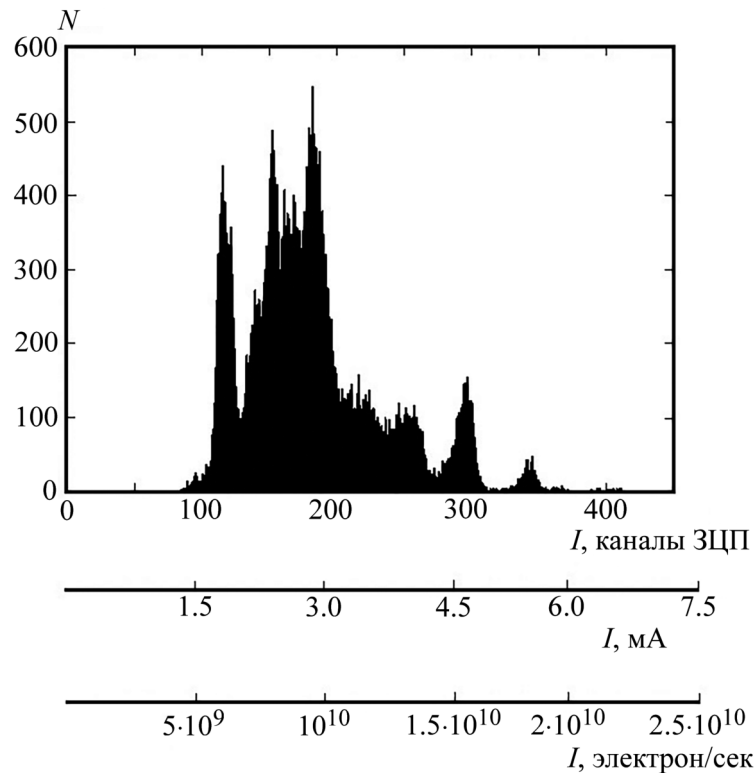


Рис. 4: Спектр величин интенсивности ускорителя за 7 часов работы, измеренный черенковским монитором.

Интенсивность выведенного пучка электронов из ускорителя “Пахра” в экспериментальный зал составляет  $\sim 10^8$  электрон/сек и для радиатора данного монитора число черенковских фотонов составит  $N_{1,2} \sim 5.4 \cdot 10^{10}$ , что будет соответствовать  $\sim 2$ -му каналу ЗЦП или  $\sim 3$  мВ по осциллографу. Для достижения уровня амплитуды сигнала монитора, соответствующему  $\sim 10^{10}$  электрон/сек, необходимо убрать ослабление сигнала, что увеличит число черенковских фотонов в потоке до  $\sim 4.5 \cdot 10^{11}$  и, соответственно, амплитуду сигнала с монитора до  $\sim 20$  канала ЗЦП. Для увеличения уровня амплитуды до  $\sim 180$  канала необходимо поднять напряжение на делителе ФЭУ монитора до величины  $\sim 1100$  В. Это определяется из данных рис. 3 с учетом зависимости амплитуды сигнала от напряжения при соответствующих интенсивностях.

Черенковский монитор способен работать и при величинах интенсивностей электронного пучка менее  $\sim 10^8$  электрон/сек, например, при интенсивности  $\sim 10^6$  электрон/сек. В этом случае при увеличении напряжения на делителе до  $\sim 1200$  В амплитуда сигнала может составить величину, соответствующую 25-му каналу ЗЦП, что вполне

приемлемо для регистрации. Увеличение толщины радиатора монитора до 10 мм при том же напряжении  $\sim 1200$  В позволит увеличить уровень амплитуды сигнала до величины  $\sim 180$ -го канала ЗЦП.

Таким образом, черенковский монитор электронного пучка ускорителя ФИАН “Пахра”, несмотря на простую конструкцию, способен определять интенсивность электронных пучков в диапазоне  $10^6 - 10^{11}$  электрон/сек.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (NISA – РФФИ) № 18-02-40061 и № 18-02-40079.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Отчет ФИАН по госконтракту с Минобрнаукой № 14.518.11.7075 по теме “Изучение стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов на уникальных установках ФИАН” (2013); (<https://sites.lebedev.ru/ru/OFVE/3141.html>; [http://x4u.lebedev.ru/phys\\_work/results2013/report-MON-2013.pdf](http://x4u.lebedev.ru/phys_work/results2013/report-MON-2013.pdf)).
- [2] A. V. Agafonov, A. V. Bagulya, O. D. Dalkarov et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 115003 (2013).
- [3] Л. И. Бабич, Е. И. Бочков, А. Н. Залялов, И. М. Куцык, Письма ЖЭТФ **97**(6), 333 (2013).
- [4] L. P. Babich, Phys. Rev. C **92**, 044602 (2015).
- [5] А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев, А. С. Русецкий, ЭЧАЯ **48**(5), 589 (2017).
- [6] С. П. Денисов, В. Н. Евдокимов, А. В. Козелов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **37**(4), 17 (2010).
- [7] В. К. Ляпидевский, *Методы детектирования излучений* (М., Энергоиздат, 1987).

Поступила в редакцию 25 апреля 2019 г.

После доработки 15 ноября 2019 г.

Принята к публикации 18 ноября 2019 г.