

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.В. Акулиничев, М.И. Грачёв, В.М. Скоркин

ИЯИ РАН, Москва, Россия

E-mail: skorkin@inr.ru

Определены потери пучка протонов линейного ускорителя в канале транспортировки экспериментального комплекса по интенсивности вторичного нейтронного излучения. Пучок протонов при взаимодействии с элементами ионопровода создаёт быстрые нейтроны. Уровни нейтронного излучения в каналах транспортировки пучка с энергией 209 МэВ и средним током до 35 мкА измерены с помощью нейтронных детекторов автоматизированной системы радиационного контроля. Максимальные потери пучка были около 0,25 %.

1. ВВЕДЕНИЕ

При транспортировке сильноточного пучка протонов линейного ускорителя до мишеней облучающих установок экспериментального комплекса возникают потери пучка на элементах ионопровода. При взаимодействии протонов пучка с материалом ионопровода в результате ядерных реакций рождаются быстрые нейтроны [1]. Основную часть нейтронного спектра составляют испарительные нейтроны с изотропным пространственным распределением и с энергией до 14 МэВ (Рис.1).

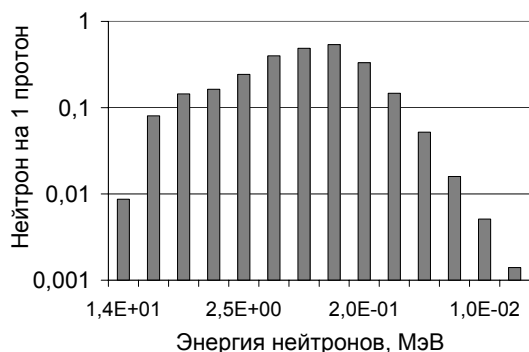


Рис.1. Спектр испарительных нейтронов

При энергии пучка протонов от 200 до 300 МэВ на один потерянный протон рождается примерно 1 испарительный нейтрон. Около 10 % выхода быстрых нейтронов составляют каскадные нейтроны более высоких энергий с резко выраженной направленностью вперёд (Рис.2.)

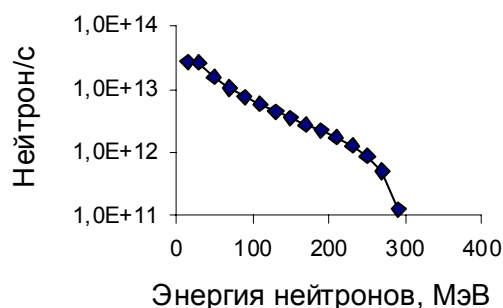


Рис.2. Спектр каскадных нейтронов при энергии пучка 300 МэВ и токе 100 мкА

В результате ядерных реакций $^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$, $^{56}\text{Fe}(p,2n)^{55}\text{Co}$, $^{56}\text{Fe}(p,pn)^{55}\text{Fe}$ и др. элементы ионопровода активируются. По измеренной наведённой активности можно определить основные участки

ионопровода, создающие потери пучка в канале транспортировки. Быстрые нейтроны от взаимодействия пучка с этими участками в канале транспортировки могут быть зарегистрированы с помощью детекторов быстрых нейтронов автоматизированной системы радиационного контроля ЭК.

2. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ФОНА

Нейтронное излучение от взаимодействия пучка протонов с элементами ионопровода было измерено с помощью детекторов быстрых нейтронов автоматизированной системы радиационного контроля (АСРК) ЭК. АСРК представляет собой сеть из нескольких десятков детекторов быстрых нейтронов УДБН-02Р, размещённых в экспериментальном зале вблизи наиболее значимых точек радиационного контроля (Рис.3).

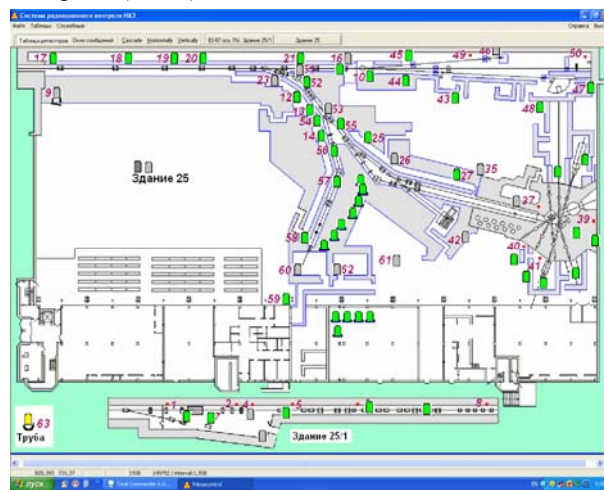


Рис.3. План размещения детекторов быстрых нейтронов автоматизированной системы радиационного контроля в экспериментальном комплексе

Часть нейтронных детекторов находится в канале транспортировки пучка протонов до мишеней облучающих установок, таких как РАДЭКС, СВЗ-100, ИН-06 и установка протонной терапии (Рис.4). Детекторы расположены вдоль ионопровода, вблизи формирующих элементов канала транспортировки пучка. Основные формирующие элементы канала транспортировки пучка протонов от линейного ускорителя до источника нейтронов ИН-06 показаны в Табл.1.

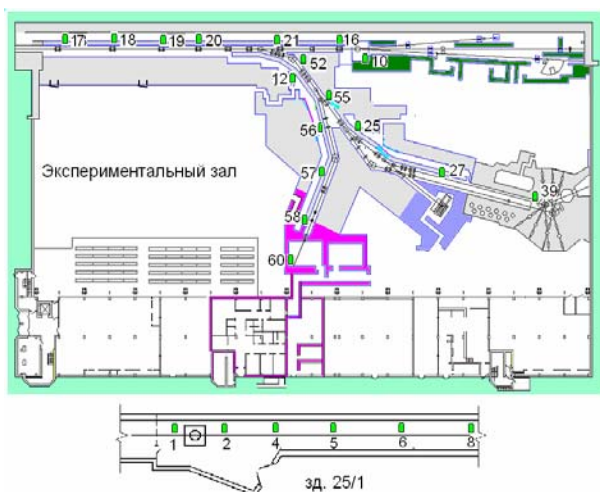


Рис.4. Схема расположения детекторов нейтронов УДБН системы АСРК в каналах транспортировки пучка

В Табл.1 указаны также номера ближайших к ним нейтронных детекторов системы АСРК и расстояние между ними.

Для определения основных элементов ионопровода, вызывающих наибольшие потери пучка, были измерены уровни наведённой активности гамма-излучения вдоль всего канала транспортировки пучка. Уровень наведённой активности на ионопроводе измерялся с помощью дозиметра гамма-излучения ДРГ-01Т через месяц после окончания сеанса на ЛУ. Результаты измерения приведены в Табл.1.

Таблица 1

Основные формирующие элементы канала транспортировки пучка протонов линейного ускорителя до источника нейтронов ИН-06

№ детект.	Формир. элемент	Расстояние, м	Навед. актив., мР/ч
1	Ловушка	2	3
5	МВВ7	5	4,5
8	Вх. в ЭЗ	4	0,08
19	Л23-24	3	1
25	Л59-60	5	50
27	Л78-79	8	112
52	Л49-50	6	35
55	Л57-58	10	300

Расстояние до ближайшего детектора нейтронов системы АСРК измерялось от активированного участка ионопровода вблизи соответствующего формирующего элемента.

При проводке пучка от линейного ускорителя на нейтронный источник ИН-06 были измерены мощности дозы нейтронного излучения в различных участках канала транспортировки пучка протонов.

Уровни нейтронного излучения измерялись при частоте импульсного тока протонов 1, 10, 25 и 50 Гц, что соответствовало среднему току пучка от 0,6 до 35 мкА. Максимальное значение уровней нейтронного излучения зарегистрировано с помощью детектора нейтронов №55 системы АСРК в канале транспортировки пучка на ИН-06 вблизи начального участка медицинского канала (Рис.5).

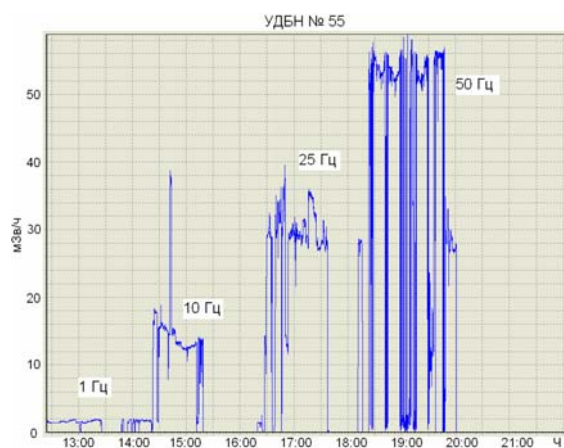


Рис.5. Временная диаграмма мощности дозы нейтронного излучения в канале транспортировки пучка на ИН-06 около участка медицинского канала

Как видно из временной диаграммы на Рис.5, средняя мощность дозы нейтронного излучения пропорциональна частоте тока протонов и, следовательно, пропорциональна среднему току пучка протонов линейного ускорителя. Это наблюдается почти на всех участках транспортировки пучка. Следовательно, относительные потери пучка в первом приближении не зависят от среднего тока пучка и определяются параметрами формирующего элемента участка транспортировки пучка.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ПУЧКА

В Табл.2 приведены средние уровни нейтронного излучения, измеренные при частотах пучка протонов 25 и 50 Гц.

Таблица 2

Уровни нейтронного излучения и величина потерь в канале транспортировки пучка до источника нейтронов ИН-06 при частотах ускорителя 25 и 50 Гц

№ детект.	Уровни излучения 25 Гц, мЗв/ч	Уровни излучения 50 Гц, мЗв/ч	Потери пучка, 50 Гц, %
1	4,5	12	0,002
5	2	4	0,004
8	0,005...0,04	0,01...0,08	$< 10^{-4}$
19	0,03...1,3	0,005...0,05	$< 10^{-4}$?
25	19	38	0,04
27	14,5	28	0,08
52	8,5	14,5	0,02
55	28	55	0,25

Измеренная мощность дозы нейтронного излучения в канале транспортировки пропорциональна частоте на большинстве участках канала, кроме ловушки пучка на 83 оси ЛУ (детектор №1) и прямого начального участка в экспериментальном зале ЭК (детекторы №8 и №19).

Все детекторы нейтронов, расположенные на этом участке канала транспортировки пучка, показывают нестабильный, в основном низкий уровень нейтронного фона и соответственно низкий уровень потерь пучка.

Потери пучка протонов η можно оценить по формуле:

$$\eta = 4\pi R^2 \frac{D_n}{I_p N K}, \quad (1)$$

где R – расстояние от активированного участка ионопровода до детектора УДБН (см); D_n – измеренная детектором УДБН мощность дозы нейтронного излучения (мЗв/ч); I_p – средний ток пучка (мкА); N – интенсивность испарительных нейтронов на 1 мкА пучка ($\sim 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{мкА}^{-1}$); K – коэффициент качества быстрых нейтронов ($\sim 10^{-3} \text{ мЗв} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}$). Величины потерь пучка, определённые по уровню нейтронного излучения в канале транспортировки, показаны в Табл.2.

Как показали расчёты, величины потерь пучка, определённые из измеренных уровней вторичного нейтронного излучения в канале транспортировки, коррелируют с уровнями наведённой активности соответствующих участков ионопровода. Исключения составляют значения, полученные для прямого начального участка канала транспортировки пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уровни вторичного нейтронного излучения в канале транспортировки пучка протонов пропорциональны величинам среднего тока пучка на большинстве измеренных участках ионопровода. Величины потерь пучка, определённые по измеренным уров-

ням вторичного нейтронного излучения, коррелируют с уровнями наведённой активности соответствующих участков ионопровода, за исключением прямого начального участка транспортировки пучка в экспериментальном зале ЭК.

Уровень нейтронного излучения в канале транспортировки пучка является хорошим качественным и количественным показателем уровня потерь пучка при транспортировке. По измеренному нейтронному излучению в каналах транспортировки можно своевременно получать информацию о потерях пучка и оперативно проводить коррекцию параметров формирующих устройств для улучшения качества проводки пучка.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, контракт № 16.518.11.7037

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Е.А. Коптелов, S.G. Lebedev, N.M. Sobolevsky, et al. // *J. Nucl. Mater.* 1996, v.233, p.1552.
2. В.Ф. Козлов. *Справочник по радиационной безопасности*. М.: «Атомиздат». 1977, с.324.

Статья поступила в редакцию 25.09.2011 г.

MEASURING BEAM LOSS OF THE PROTON LINAC BY DETECTING NEUTRON RADIATION

S.V. Akulinichev, M.I. Grachev, V.M. Skorkin

The method for determination of a proton beam loss of the proton linac by measuring neutron radiation is presented. Proton beams interact with elements of ion guide and the generation fast neutrons. Levels of a neutron radiation in channels transporting the beam with energy of 209 MeV and average current up to 35 μA have been measured using neutron detectors of the automatic radiation monitoring system. Maximum loss of the beam during its transportation was 0,25 %.

ВИМІР ВТРАТ ПУЧКА ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ПРОТОНІВ ПО ІНТЕНСИВНОСТІ НЕЙТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

С.В. Акулінічев, М.І. Грачов, В.М. Скоркін

Визначено втрати пучка протонів лінійного прискорювача в каналі транспортування експериментального комплексу по інтенсивності вторинного нейтронного випромінювання. Пучок протонів при взаємодії з елементами іонопровода створює швидкі нейтрони. Рівні нейтронного випромінювання в каналах транспортування пучка з енергією 209 МеВ і середнім струмом до 35 мкА виміряні за допомогою нейтронних детекторів автоматизованої системи радіаційного контролю. Максимальні втрати пучка були близько 0,25 %.