

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



Л.Н. Латышева, С.Г. Лебедев, Н.М. Соколевский,  
А.В. Фещенко

**Стенд для облучения электронных плат  
на линейном ускорителе протонов  
ИЯИ РАН: потоки частиц,  
активация и мощность дозы**

препринт  
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1426/2016  
НОЯБРЬ 2016

МОСКВА 2016 MOSCOW



Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



**Л.Н. Латышева, С.Г. Лебедев, Н.М. Соболевский,  
А.В. Фещенко**

**Стенд для облучения электронных плат  
на линейном ускорителе протонов  
ИЯИ РАН: потоки частиц,  
активация и мощность дозы**

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1426/2016  
НОЯБРЬ 2016

препринт  
preprint

МОСКВА 2016 MOSCOW

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



Л.Н. Латышева, С.Г. Лебедев, Н.М. Соболевский,  
А.В. Фещенко

Стенд для облучения электронных плат  
на линейном ускорителе протонов  
ИЯИ РАН: потоки частиц,  
активация и мощность дозы

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1426/2016

НОЯБРЬ 2016

МОСКВА

2016

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences  
60-th October Anniversary prospect 7a,  
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
проспект 60-летия Октября, 7а  
Москва, 117312

Л.Н. Латышева, С.Г. Лебедев,  
Н.М. Соболевский, А.В. Феценко

Стенд для облучения электронных плат  
на линейном ускорителе протонов  
ИЯИ РАН: потоки частиц, активация  
и мощность дозы

С использованием адронного транспортного кода SHIELD и программы расчета активации и остывания мишени DCHAIN-SP выполнено моделирование Стенда для облучения электронных плат, планируемого в ИЯИ РАН на пучке линейного ускорителя протонов. Приняты максимальные параметры пучка протонов: энергия 209 МэВ, ток 1 мкА. Вычислены полные и дифференциальные по энергии потоки нейтронов из ловушки пучка в экспериментальный зал. Оценены потоки вторичных нуклонов (альbedo из ловушки), приходящих на электронную плату, облучаемую пучком протонов. Вычислена активация и ход остывания платы и элементов ловушки пучка после облучения в течение одной смены (8 часов). Для электронной платы вычислена мощность дозы, а также скорость нагрева пучком протонов. Показано, что мощность дозы после суток остывания не превышает предельно допустимую, для персонала категории А. Скорость нагрева платы значительна и требует организации сканирования пучка. Потоки нейтронов в экспериментальный зал должны быть снижены дополнительной биологической защитой. Потоки нейтронов в окружающем пространстве за защитой тоннеля на два порядка и более ниже допустимых величин.

ISBN 978-5-94274-316-1

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук, 2016  
Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences, 2016

Л.Н. Латышева, С.Г. Лебедев, Н.М. Соболевский,  
А.В. Феценко

Стенд для облучения электронных плат  
на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН:  
потоки частиц, активация и мощность дозы

Препринт 1426/2016

Ноябрь 2016

Подписано в печать 27.09.2016

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,0. Зак. 22405 Тираж 70 экз.  
Бесплатно

Печать цифровая  
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

---

---

## 1. Введение

Изучение воздействия протонного облучения на радиоэлектронную аппаратуру представляет интерес для различных приложений. В ИЯИ РАН планируется создать Стенд для облучения электронных плат пучком протонов в интервале энергий от 50 до 209 МэВ при интенсивности до 1 мкА.

В настоящей работе представлены данные по потокам вторичных нейтронов и протонов, а также активации и мощности дозы, в облучаемой электронной схеме и элементах ловушки пучка, полученные методом Монте-Карло с использованием транспортного кода SHIELD [1]. Расчеты проводились при энергии протонов 209 МэВ и среднем токе 1 мкА. Такие параметры обеспечивают максимальное воздействие на облучаемый объект и окружающую среду.

## 2. Потоки нейтронов из ловушки пучка в экспериментальный зал

Схема ловушки пучка представлена на Рис.1. В расчете точно воспроизводилась геометрия и химический состав облучаемой сборки, а также профиль пучка. Электронная схема располагалась в прямом пучке протонов, на расстоянии 50 см перед графитовой мишенью. Цифрами 10-15 обозначены поверхности ловушки, на которых регистрировались потоки вторичных нейтронов, влетающих в экспериментальный зал. На рисунке представлены также полные потоки нейтронов с указанных поверхностей на один первичный протон. Как видно, наиболее напряженными по нейтронным потокам являются поверхности 10 и 12, расположенные вблизи области взаимодействия пучка с графитовой мишенью.

В пересчете на ток протонов 1 мкА, полные потоки нейтронов с поверхностей 10 и 12 составляют  $2.2 \cdot 10^7$  н/см<sup>2</sup>/с и  $5.5 \cdot 10^5$  н/см<sup>2</sup>/с соответственно. Эти значения должны быть снижены дополнительной защи-

Пучок протонов:  
 энергия 50 МэВ, 100 МэВ, 160 МэВ, 209 МэВ,  
 максимальный средний ток 1 мкА,  
 радиус пуска на графите 15 мм

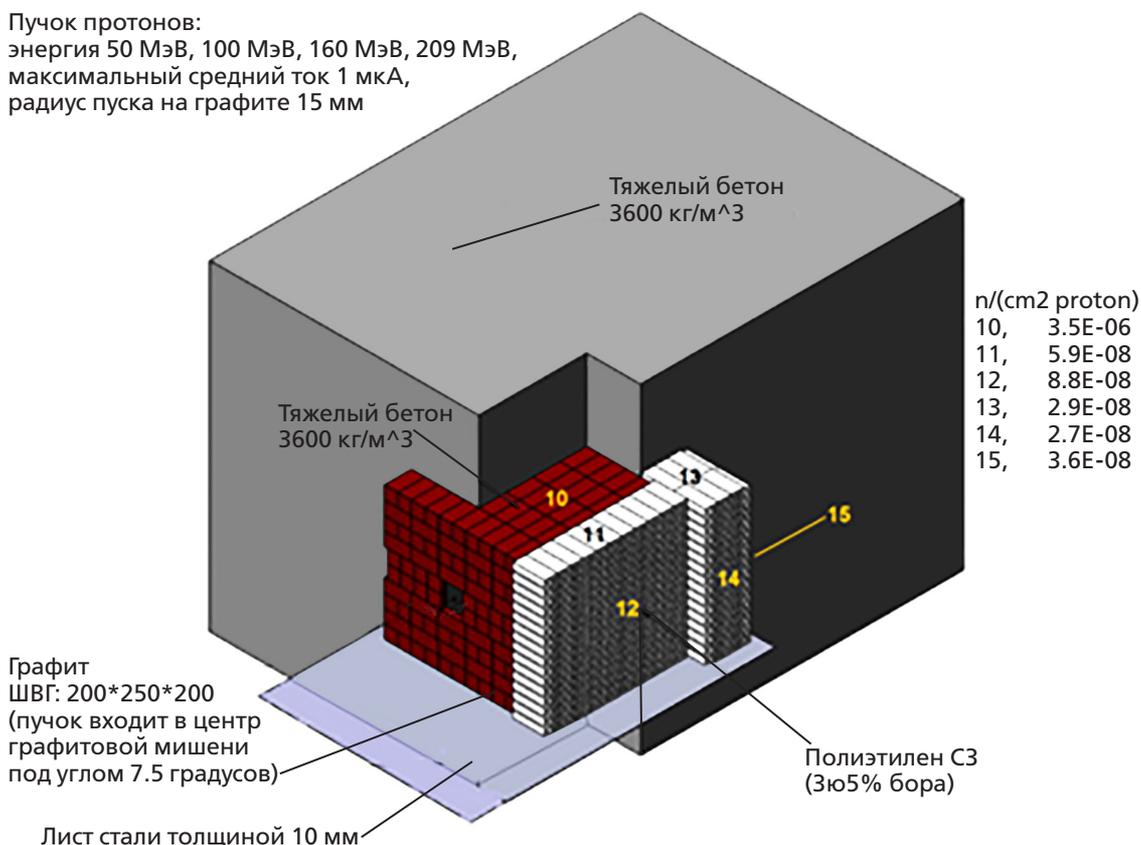


Рис.1. Схема ловушки пучка. Цифры 10-15 соответствуют поверхностям ловушки, на которых регистрировались потоки нейтронов в экспериментальный зал

той на семь и пять порядков соответственно, чтобы удовлетворять требованиям радиационной безопасности. Как видно, направление вверх является наиболее опасным.

Распределение плотности потока нейтронов по энергиям с наиболее напряженных поверхностей 10 и 12 представлено на Рис.2. На рисунке видно, что потоки нейтронов низких энергий, проходящих через борированный полиэтилен (поверхность 12), сильно подавлены и статистически плохо обеспечены в расчете.

### 3. Влияние ловушки пучка на облучение электронной платы

Важным является вопрос о влиянии частиц, рассеянных назад из ловушки пучка, на облучение электронной платы. Для выяснения этого влияния были проведены расчеты потоков нейтронов и протонов, пересекающих электронную плату, как с ловушкой пучка, так и без нее.

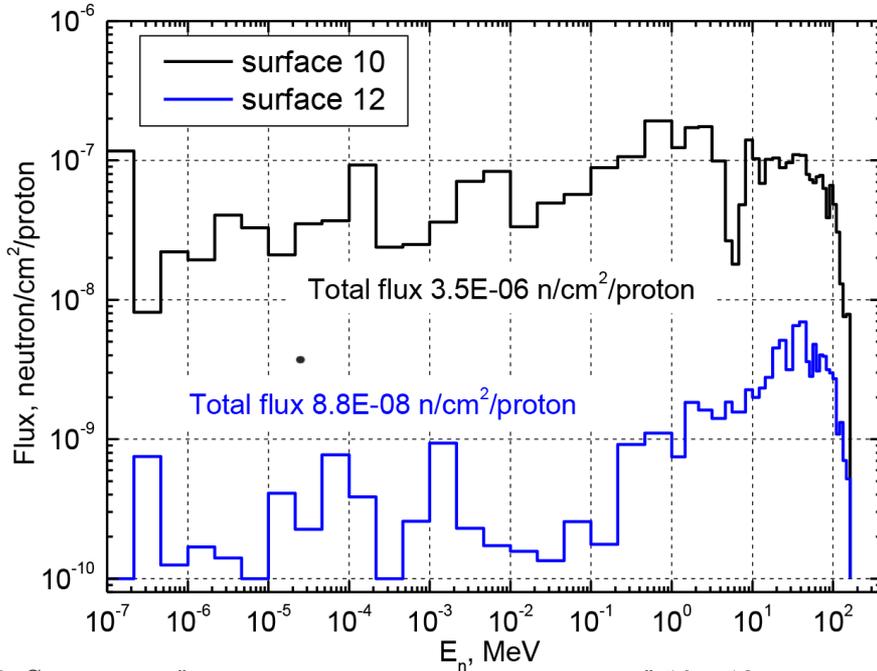


Рис.2. Спектры нейтронов, вылетающих с поверхностей 10 и 12 ловушки пучка

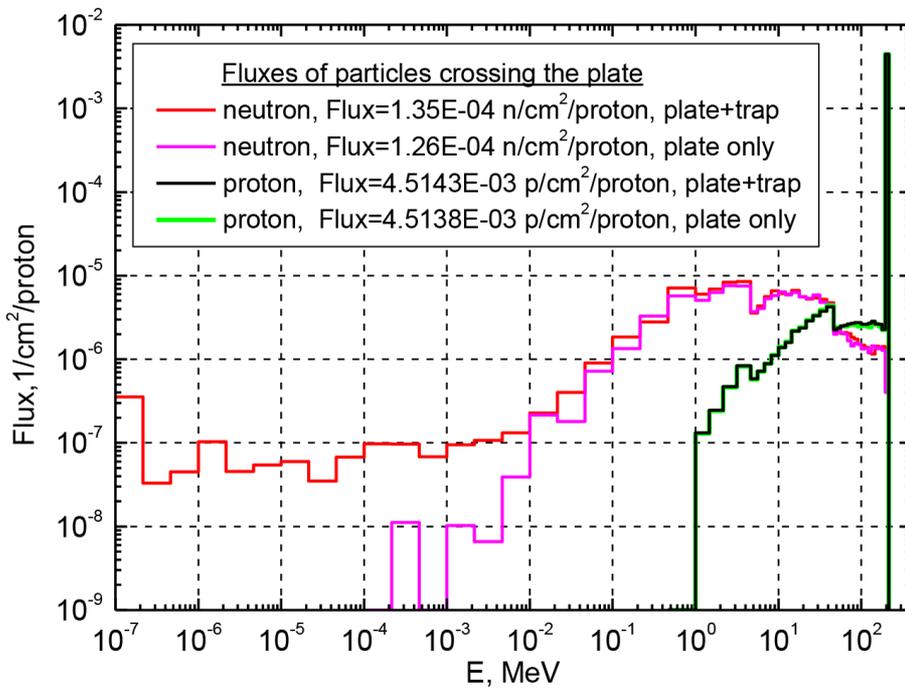


Рис.3. Спектры протонов и нейтронов, пересекающих электронную плату

При моделировании процессов в электронной плате предполагался следующий химический состав (проценты весовые): кремний – 90%, эпоксидная смола — 5%, медь — 5%. Размеры платы 15×15×0.7 см, плотность 2.39 г/см<sup>3</sup>. Результаты представлены на Рис.3.

Как видно из Рис.3, электронная плата будет облучаться низкоэнергетическими нейтронами, рассеянными назад из ловушки пучка. Однако энергии этих нейтронов находятся в области ниже 0.01 МэВ, а их поток не превышает 10% от потока нейтронов, образовавшихся в самой плате. Поэтому такие нейтроны не могут повлиять на результаты экспериментов по облучению электронных схем протонами с энергиями в десятки и сотни МэВ.

Данные, приведенные на Рис.3, свидетельствуют об отсутствии протонов, рассеянных из ловушки в сторону электронной платы. На рисунке виден только пучок первичных протонов, и протоны, образовавшиеся в ядерных реакциях внутри платы.

#### **4. Активация элементов ловушки и электронной платы**

Следующим важным вопросом является активация элементов сборки, скорость остывания и мощность дозы. При расчете активации элементов ловушки и электронной платы использовалась программа DCHAIN-SP [2,3]. Эта программа позволяет рассчитывать активацию и остывание мишени при облучении пучком ускорителя с учетом всех возможных радиоактивных цепочек путем решения системы уравнений Бэтмена. Входными данными для программы DCHAIN-SP служат скорости образования радионуклидов, которые вычисляются каким-либо транспортным кодом, в данном случае — кодом SHIELD.

Рассматривался следующий сценарий: облучение сборки протонами с энергией 209 МэВ при токе 1 мкА в течение одной смены (8 часов), с последующим остыванием в течение 90 дней. Данные по активации, и ее убыванию, представлены на Рис. 4–6, где показана суммарная активность всех радиоизотопов, существующих в сборке на данный момент времени. Первая точка на оси времени соответствует одному часу после выключения пучка.

Как можно видеть из данных, представленных на Рис.4-6, полная активность разных элементов сборки спадает на 1–2 порядка в течение суток после выключения пучка. Наиболее активированы графитовая мишень и защита из бетона с чугунной дробью. Однако мишень,

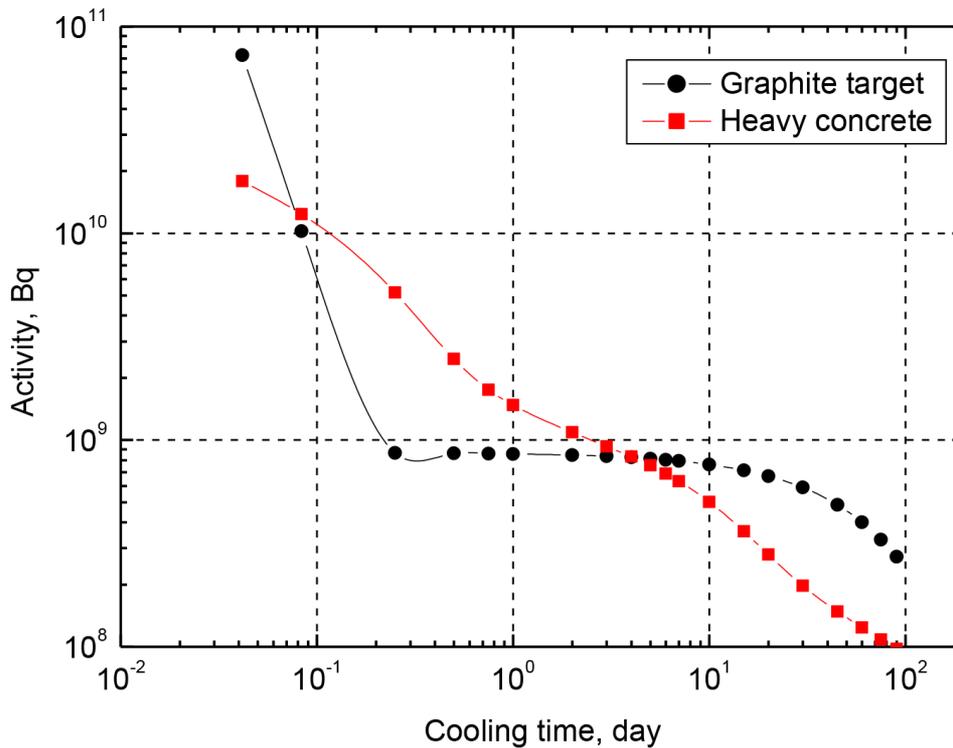


Рис.4. Суммарная активность всех радионуклидов (Бк), образовавшихся в графитовой мишени и тяжелом бетоне (красный цвет на Рис.1)

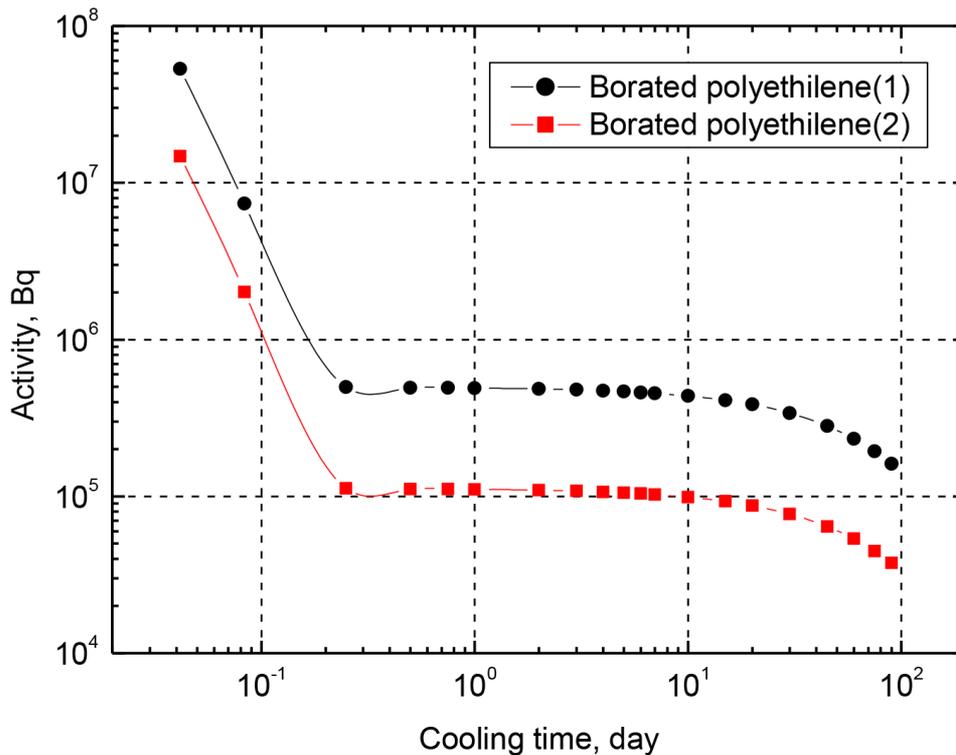


Рис.5. Суммарная активность всех радионуклидов (Бк), образовавшихся в борированном полиэтилене

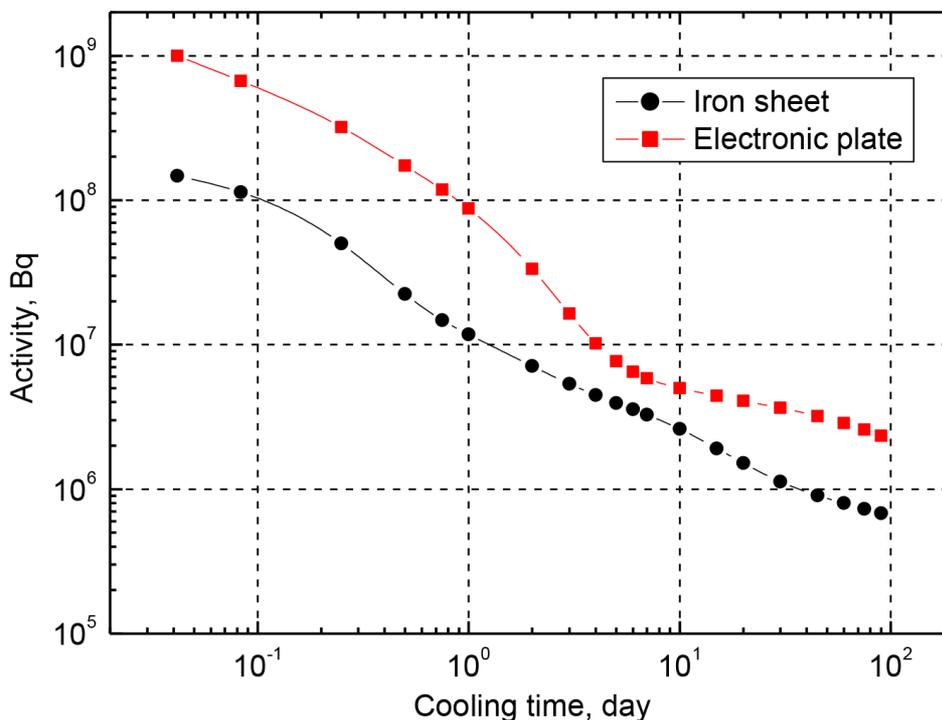


Рис.6. Суммарная активность всех радионуклидов (Бк), образовавшихся электронной платой и стальном листе

а также элементы радиационной защиты из борированного полиэтилена, остывают очень быстро. Электронная плата остывает за сутки на порядок, и еще в 20 раз за следующие девять суток.

## 5. Мощность дозы

Программа DCHAIN-SP вычисляет активность (Бк) каждого индивидуального радиоизотопа, в каждой геометрической зоне сборки, в заданные моменты времени облучения и остывания. Это позволяет вычислить мощность дозы в эти моменты времени, используя коэффициенты перехода от активности (Бк) к мощности дозы (Зв/час) согласно Таблице 2 из работы [4]. Умножая активность на коэффициент перехода, получаем вклад в эквивалентную дозу (Зв/час) от конкретного радиоизотопа. Складывая вклады от всех радиоизотопов, получаем эквивалентную дозу на данный момент времени остывания.

Таблица 2 из работы [4] содержит коэффициенты перехода для точечного источника, находящегося в воздухе на расстоянии 1 м от облучаемого объекта, которым является ICRU сфера Н'(10) (тканеэквивалентный фантом, D=30 см, глубина 10 мм). Если излучающий объем

мал по сравнению с расстоянием 1 м (например, электронная плата), то эквивалентная доза вычисляется достаточно точно. Если указанные размеры сопоставимы, то получается лишь правдоподобная оценка, т.к. с одной стороны источник не является точечным, но с другой — часть излучения не выйдет наружу из-за большого размера излучающего объема.

В Таблице 1 представлена эквивалентная доза (Зв/час), вычисленная согласно описанной выше процедуре, в момент выключения пучка, через 1 час и через сутки после выключения. Излучающими элементами являются (см. Рис.1) графитовая мишень, бетонный куб (показан красным цветом), два объема борированного полиэтилена, стальной лист и электронная плата. Энергия протонов 209 МэВ, ток 1 мкА, время облучения 8 часов.

## 6. Энерговыведение в электронной плате

Что касается электронной платы, то для нее кроме активации необходимо знать мощность энерговыведения. При энергии протонов 209 МэВ энерговыведение в плате составляет 6.52 МэВ/протон. Энерговыведение происходит в сечении пучка, радиус которого принят равным  $R = 1.5$  см. При толщине платы 0.7 см объем области пучка в плате составляет 4.95 см<sup>3</sup>, а мощность тепловыведения — 1.32 МэВ/(см<sup>3</sup>·протон).

При токе 1 мкА мощность тепловыведения составляет  $Q = 8.24 \times 10^{12}$  МэВ/(см<sup>3</sup>·с) или  $Q = 1.32$  Дж/(см<sup>3</sup>·с) или, при плотности материала платы  $\rho = 2.39$  г/см<sup>3</sup>,  $Q = 0.552$  Дж/(г·с).

Принимая теплоемкость материала платы (состоящей на 90% из кремния) равной  $C \approx 0.7$  Дж/(г·°С), получим оценку скорости нагрева  $Q/C \approx 0.8$  град/с. Таким образом, температура плавления кремния  $\sim 1400$  °С может быть достигнута за полчаса облучения. Поэтому придется организовать сканирование пучка, либо принимать дру-

Таблица 1  
Эквивалентная доза (Зв/час)  
как функция времени остывания

Источник излучения	Время с момента выключения пучка		
	0 часов	один час	одни сутки
Мишень (графит)	$8.85 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$	$6.61 \cdot 10^{-6}$
Тяжелый бетон	$1.18 \cdot 10^{-2}$	$1.41 \cdot 10^{-2}$	$5.02 \cdot 10^{-4}$
Борир. полиэтилен 1	$6.49 \cdot 10^{-5}$	$8.45 \cdot 10^{-6}$	$3.72 \cdot 10^{-9}$
Борир. полиэтилен 2	$1.80 \cdot 10^{-5}$	$2.34 \cdot 10^{-6}$	$8.27 \cdot 10^{-10}$
Стальной лист	$9.84 \cdot 10^{-6}$	$7.88 \cdot 10^{-6}$	$3.79 \cdot 10^{-6}$
Электронная плата	$6.79 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^{-4}$	$2.75 \cdot 10^{-5}$

гие меры: увеличить сечение пучка до размеров электронной платы, снижать ток пучка и др.

## 7. Потоки нейтронов за пределами туннеля ускорителя

Существенным аспектом в работе облучательного стенда является доза ионизирующего излучения в ближайших окрестностях, таких как дорога, проходящая вдоль комплекса зданий линейного ускорителя. Здесь могут находиться люди, не относящегося к персоналу ускорителя, что налагает жесткие требования к биологической защите облучательного стенда и может ограничить величину предельного тока протонов, падающих на ловушку пучка (Рис. 1). Как видно из Рис. 1 и 2, наиболее интенсивные потоки вторичных нейтронов испускаются из ловушки вверх с поверхности 10, а также менее интенсивные потоки — с поверхности 12 в направлении на дорогу. В этих направлениях биологическая защита обеспечивается слоем грунта толщиной 600 см (насыпь над туннелем ускорителя).

Поскольку расчеты ослабления потоков нейтронов в протяженной защите методом Монте-Карло требуют значительных затрат машинного времени, оценка ослабления потоков вторичных нейтронов проводилось методом длины релаксации [7].

Ослабление плотности потока коллимированного пучка нейтронов слоем вещества происходит по экспоненциальному закону

$$\varphi(x) = \varphi_0 \cdot \exp(-\Sigma \cdot x) \quad (1)$$

где  $\varphi_0$  — плотность потока нейтронов до прохождения слоя,  $\varphi(x)$  — плотность потока после прохождения слоя толщиной  $x$ ,  $\Sigma$  — макроскопическое сечение.

Макроскопическое сечение для однородного вещества атомного веса  $A$  равно

$$\Sigma = n\sigma_t = (\rho N_0/A)\sigma_t, \quad (2)$$

где  $n = (\rho N_0/A)$  — концентрация ядер  $1/\text{см}^3$ ,  $\rho_t$  — полное сечение взаимодействия нейтрона с ядром,  $\rho$  — плотность вещества  $\text{г}/\text{см}^3$ ,  $N_0$  — число Авогадро. Макроскопическое сечение  $\Sigma$  имеет размерность  $1/\text{см}$  и называется также линейным коэффициентом ослабления.

Для защит, представляющих собой смесь нескольких элементов, суммарное макроскопическое сечение рассчитывается по формуле

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \dots \Sigma_n, \quad (3)$$

где  $\Sigma_i$  — парциальное макроскопическое сечение элемента №i. При расчете парциального макросечения  $\Sigma_i$  по формуле (2) используется атомный вес  $A_i$  и парциальная плотность  $\rho_i$  элемента №i, равная произведению плотности материала защиты  $\rho$  на весовую долю  $\delta_i$  элемента №i:  $\rho_i = \rho \cdot \delta_i$ .

Химический состав грунта и весовые доли элементов, принятые в настоящей оценке, представлены в Таблице 2. Там же даны парциальные плотности и концентрации элементов при плотности грунта  $\rho = 2.7 \text{ г/см}^3$ .

Таблица 2. Параметры грунта при плотности  $\rho = 2.7 \text{ г/см}^3$

Элемент	Z	A	Весовая доля $\delta$	Парциальная плотность, $\text{г/см}^3$	Концентрация $1/\text{см}^3$
O	8	15.9994	0.4828	1.304	$4.907 \cdot 10^{22}$
Si	14	28.0855	0.257	0.694	$1.488 \cdot 10^{22}$
Al	13	26.9815	0.0765	0.207	$4.610 \cdot 10^{21}$
Fe	26	55.847	0.0624	0.168	$1.817 \cdot 10^{21}$
Ca	20	40.08	0.0579	0.156	$2.349 \cdot 10^{21}$
Mg	12	24.305	0.0323	0.087	$2.161 \cdot 10^{21}$
Na	11	22.9898	0.0181	0.049	$1.280 \cdot 10^{21}$
K	19	39.0983	0.013	0.035	$5.406 \cdot 10^{20}$

Полные сечения нейтрон-ядерных взаимодействий  $\sigma_t$ , необходимые для расчета парциальных макросечений  $\Sigma_j$ , брались из справочника по групповым константам АББН [6], а при энергиях нейтронов 20 МэВ и выше — вычислялись на основе блока полных и неупругих сечений кода SHIELD [1].

Результаты расчета полного макроскопического сечения  $\Sigma(3)$  как функции энергии представлены на Рис.7. Как видно из рисунка, макросечение принимает минимальное значение при максимально возможной энергии нейтронов 209 МэВ. Точное значение макросечения при этом равно  $\Sigma_{\min} = 0.0355 \text{ см}^{-1}$ . При толщине грунта  $x = 600 \text{ см}$  полу-

чаем, согласно (1), ослабление потока в  $5.46 \cdot 10^{-10}$  раз, т.е. наименьшее ослабление среди всех энергий. Как и следовало ожидать, быстрые каскадные нейтроны имеют наибольшие шансы пройти через защиту.

Данные Рис.7 позволяют вычислить ослабление потока нейтронов при другой плотности грунта, т.к. макроскопическое сечение прямо пропорционально плотности.

Как видно из Рис.1 и 2, максимальный поток вторичных нейтронов направлен вверх с поверхности №10 ловушки пучка и равен  $2.2 \cdot 10^7$  н/см<sup>2</sup>/с при токе 1 мкА. При ослаблении в  $5.46 \cdot 10^{-10}$  раз поток нейтронов за защитой будет  $\sim 10^{-2}$  н/см<sup>2</sup>/с, что на два порядка ниже допустимого уровня для населения. Поток нейтронов в сторону дороги будет еще на два порядка ниже. Кроме того, приведенная оценка относится к наиболее проникающим быстрым нейтронам, которых в потоке вторичных нейтронов лишь малая часть. Таким образом, существующей защиты тоннеля ускорителя заведомо достаточно для эксплуатации облучательного стенда.

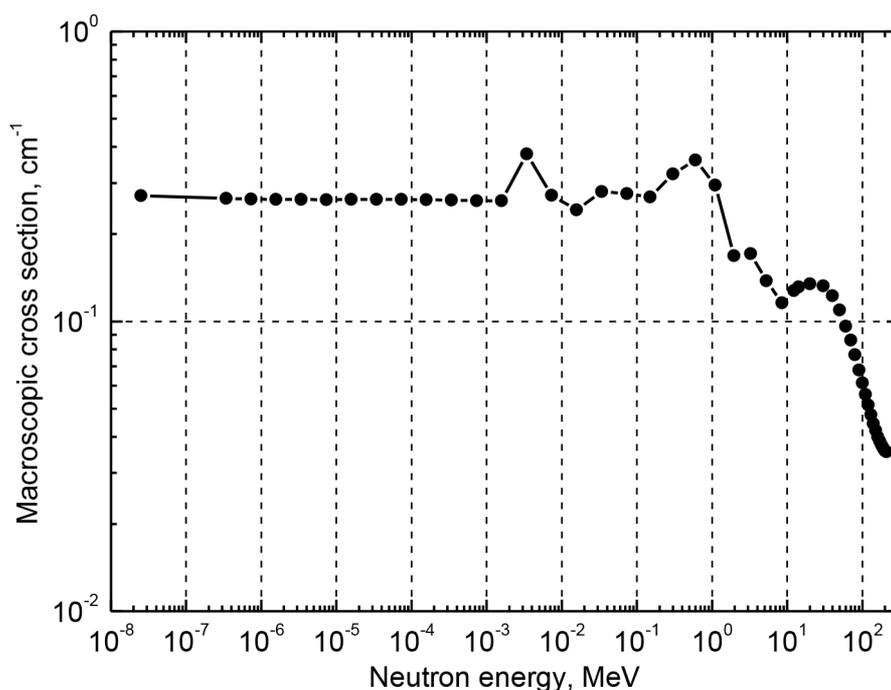


Рис.7. Полное макроскопическое сечение  $\Sigma$  (3) как функция энергии нейтрона при плотности грунта  $\rho = 2.7$  г/см<sup>3</sup>

## 8. Заключение

В результате проведенного моделирования Стенда для облучения электронных плат при максимальных параметрах пучка протонов — энергия 209 МэВ, ток 1 мкА — можно сделать следующие выводы.

1. При наличии пучка ускорителя на Стенде, интегральные по энергии потоки нейтронов в экспериментальный зал довольно велики:  $5.5 \cdot 10^5$  н/см<sup>2</sup>/с в горизонтальном направлении и  $2.2 \cdot 10^7$  н/см<sup>2</sup>/с в верхнюю полусферу. Чтобы удовлетворять требованиям радиационной безопасности работы персонала, необходимо установить дополнительную биологическую защиту.

2. При отсутствии пучка ускорителя опасность представляет наведенная активность. Наиболее важна активность электронной платы и мощность дозы, обусловленная этой активностью, т.к. далее с платой необходимо проводить измерения. Согласно данным Табл. 1, мощность дозы от платы через сутки после окончания облучения составляет 27.5 мкЗв/час. Для персонала категории А, работающего с источниками ионизирующих излучений, установлена предельно допустимая доза 50 мЗв/год (5 бэр/год), т.е. 28 мкЗв/час при 36 часовой рабочей неделе [5]. Поэтому можно начинать работы с платой через сутки после окончания облучения.

3. При радиусе пучка протонов  $R = 1.5$  см скорость нагрева платы в области пучка довольно высока:  $\sim 0.8$  град/с. Поэтому необходимо организовать сканирование пучка, либо принимать другие меры: увеличить сечение пучка до размеров электронной платы, снижать ток пучка и др.

4. Потоки нейтронов и протонов альbedo от ловушки пучка на облучаемую электронную плату малы и не искажают эффект облучения.

5. Существующей земляной насыпи над тоннелем ускорителя заведомо достаточно для защиты окружающего пространства от вторичных нейтронов. Запас составляет от двух до нескольких порядков.

6. При снижении тока пучка относительно 1 мкА все эффекты, приведенные выше, снижаются пропорционально уменьшению тока. Если снижать энергию пучка при фиксированном токе, то эффекты облучения также будут снижаться, однако для более точного ответа потребуется провести аналогичное моделирование при данной энергии.

## Литература

1. <http://www.inr.ru/shield/>
2. Соболевский Н.М., Латышева Л.Н., Мустафин Э. *Адаптация программы DCHAIN SP для совместного использования с транспортным кодом SHIELD*. Препринт ИЯИ РАН 1253/2010, Москва, 2010.
3. Takada H., Kosako K. *Development of the DCHAIN SP for Analysis Decay and Build-up Characteristics of Spallation Products*. JAERI Data/Code 99 008.
4. Petoussi N., Zankl M., Fehrenbacher G., Drexler G. *Dose distribution in the ICRU sphere for monoenergetic photons and electrons and for ca. 800 radionuclides*. GSF – Bericht 7/93, March 1993.
5. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П., Ковалев Е.Е. *Защита от излучений ядерно-технических установок. Том 2*. М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. *Групповые константы для расчета реакторов и защиты*. М.: Энергоатомиздат, 1981.
7. Кимель Л.Р., Машкович В.П. *Защита от ионизирующих излучений. Справочник*. М.: Атомиздат, 1972.

---

---

Для заметок

---

---

Для заметок

