

## ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОНИКИ ИОНИЗАЦИОННОГО МОНИТОРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПУЧКА ОТ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ИЯИ РАН

*С.А. Гаврилов\*, И.А. Васильев, П.И. Рейнгардт-Никулин, Н.М. Соболевский, А.В. Фещенко*

*ИЯИ РАН, Москва, Россия;*

*\*Московский физико-технический институт (ГУ), г. Долгопрудный, Россия*

*E-mail: s.gavrilov@gmail.com*

Для измерения параметров пучка ускоренных протонов на выходе линейного ускорителя (ЛУ) ИЯИ РАН используется ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС) на остаточном газе, в состав которого входит ТВ-камера с ПЗС-матрицей. Взаимодействия ореола ускоренного пучка с элементами вакуумной камеры ЛУ приводят к возникновению потока нейтронов, вызывающих повреждения в цифровой электронике ИМПС. Для устранения данных проблем был разработан и установлен на ЛУ зеркально-линзовый тракт (ЗЛТ). Ниже приводятся: описание общей организации ИМПС, ЗЛТ, обсуждение радиационной обстановки в зале ЛУ и за бетонной защитой, а также оценка потока нейтронов, падающего на ТВ-камеру, и времени удовлетворительной работы ТВ-камеры.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения прозрачных измерений поперечного сечения и профилей токовых импульсов пучка ускоренных частиц в широком диапазоне энергий и амплитуд на выходе линейного ускорителя (ЛУ) протонов ИЯИ РАН используется специальный ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС) на остаточном газе, в состав которого входит ТВ-камера с ПЗС-матрицей. Детальное описание ИМПС и его работы приведены в [1, 2].

Взаимодействия ускоренных частиц ореола пучка с элементами вакуумной камеры ЛУ приводят к возникновению потоков нейтронов, вызывающих повреждения и сбои в чувствительной к радиации электронике ИМПС (ПЗС-матрица ТВ-камеры, микросхемы памяти, АЦП и пр.). Эти повреждения (если они накапливаются), в свою очередь, создают дополнительные проблемы, так как отношение сигнала к шуму быстро, в течение нескольких часов, ухудшается из-за повреждения пикселей ПЗС-матрицы (Рис.1, белые точки).

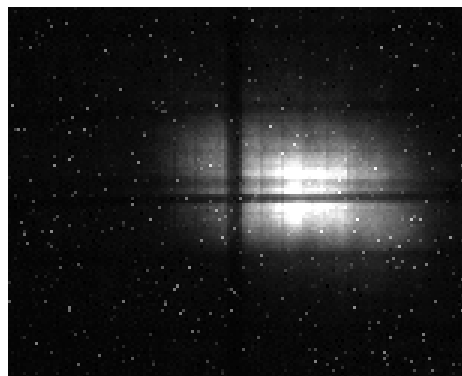
Регистрация изображений поперечного сечения и других параметров пучка производится, во-первых, во время настройки ЛУ и, во-вторых, на настроенном пучке при изменении интенсивности пучка в диапазоне от 120 мкА до 10 нА среднего тока. Из опыта эксплуатации ЛУ известно, что средние потери протонов при среднем токе пучка 120 мкА достигают примерно 1 нА/м после полной продольно-поперечной настройки ЛУ. В этом случае можно считать, что нейтронный поток образуется протяженным вдоль оси ЛУ источником, так как на выходе ЛУ в месте установки ионизационного датчика пучок ускоренных протонов имеет в настоящее время непрерывную структуру импульсов тока.

Однако усредненный уровень потерь в месте установки ИМПС во время настройки ЛУ даже на частоте посылок 1 Гц может быть сравним и даже больше, чем потери на настроенном пучке. В этом случае можно приблизительно считать, что

нейтронный поток образуется точечным источником, расположенным рядом с ИМПС.

Так как взаимодействие потоков нейтронов и  $\gamma$ -квантов с элементами ПЗС-матрицы (ПЗСМ) вызывает появление поврежденных или, по-другому, «горячих» пикселей и сбои в микросхемах цифровой электроники, то необходимо принимать меры по защите этих элементов от воздействия радиации.

Причем нужно учитывать, что в процессе перенастройки ускорителя для различных экспериментов и прикладных работ возможно изменение интенсивности пучка в  $10^4$  раз, что приводит к пропорциональному изменению как яркости изображений поперечного сечения пучка, так и потерь в такое же число раз. И значит, необходимо защитить электронику при повышенной интенсивности, не теряя чувствительности при минимальной интенсивности.



*Рис.1. Изображение поперечного сечения пучка и поврежденных пикселей ПЗС-матрицы. Длительность экспозиции 990 мс*

Для выполнения этих противоречивых требований и устранения проблем с повреждением электроники был разработан и установлен на ЛУ зеркально-линзовый тракт (ЗЛТ), собирающий и выводящий оптическое излучение с люминофора детектора ИМПС на ТВ-камеру за бетонную защиту зала ЛУ без существенной потери светового потока регистрируемого излучения (Рис.2).

## 2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАКТА

Вакуумный бокс с детектором установлен примерно в 4 м за последним ускоряющим резонатором ЛУ ИЯИ. Зеркально-линзовый тракт, состоящий из шести линз (стекло К8) и трех зеркал, передает изображение за бетонную защиту по траектории, общая длина которой в настоящее время равна приблизительно 6 м. В первоначальном варианте камера устанавливалась на расстоянии 40 см от оси пучка и, соответственно, на камеру падали все типы излучений, существующие вокруг канала транспортировки пучка.

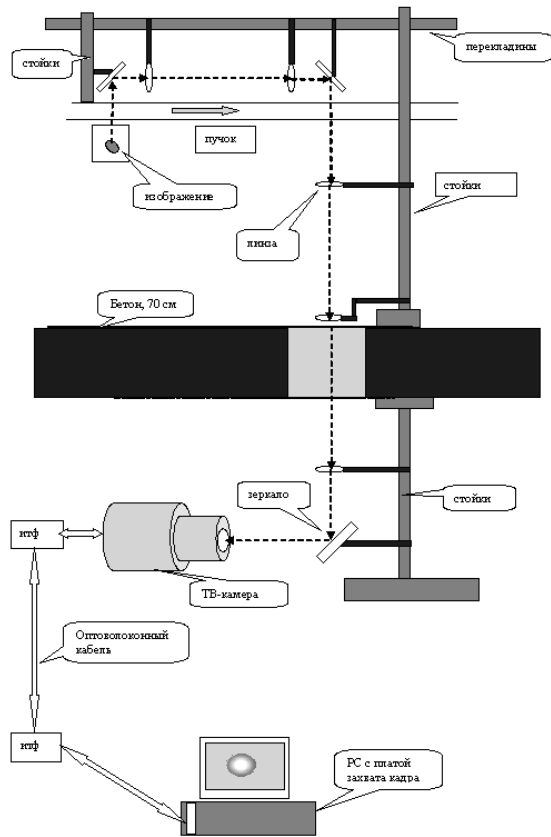


Рис.2. Упрощенная схема ИМПС с зеркально-линзовым трактом

Отношение сигнала к шуму в измерительной системе определяется многими факторами, такими как наличие битых пикселей, свечение остаточного газа, бомбардировка  $\gamma$ -квантами и рентгеновскими фотонами, шумом чтения ПЗСМ, среднеквадратичным отклонением заряда пикселя. Однако основной характеристикой является минимально различимый поток ионов, извлекаемых из остаточного газа, равный примерно 600...700 ионов/(мм<sup>2</sup>·с) [2]. И именно этот поток можно зарегистрировать без влияния горячих пикселей.

## 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ЭЛЕКТРОНИКОЙ

Увеличение расстояния между камерой и протонным пучком и наличие бетонной защиты позволяют снизить эффекты бомбардировки ПЗСМ нейтронами и убрать ее засветку  $\gamma$ -квантами.

Тем не менее, основную опасность для ПЗСМ за бетонным полом представляют: остаточный поток нейтронов, вызывающий смещение атомов кремния в решетке, и ядерные реакции в пикселях кремниевой матрицы. Согласно [3] сечения ядерных взаимодействий в кремниевых микросхемах высокой плотности при увеличении энергии нейтронов выше 2...5 МэВ начинают быстро возрастать, достигая своего максимального значения  $\Sigma \sim 1...2$  барн при 14 МэВ.

Экспериментальное изучение зависимости поперечного сечения сбоев от энергии нейтронов для схем памяти меньшей плотности обнаруживает, что сечение ядерных взаимодействий носит пороговый характер, возникая при энергиях нейтронов около 10 МэВ.

Для микросхем с меньшей степенью интеграции, т.е. с большим объемом элементов, сечение постепенно растет с увеличением энергии нейтронов и достигает максимума при энергии нейтронов около 100 МэВ.

Критический заряд, приводящий к сбою электроники, оценивается величиной  $10^{-13}$  Кл [4]. Ширина чувствительной области твердотельной схемы памяти равна примерно 2 мкм. Поэтому, ионизирующая частица должна терять на производство электронно-дырочных пар около 2 МэВ на пути 2 мкм (3,6 эВ тратится на 1 электронно-дырочную пару в кремнии). Из оценок критического заряда –  $2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл } 10^6 \text{ эВ} / 3,6 \text{ эВ}) \approx 0,9 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$  – следует, что вероятнее всего ядерные фрагменты являются источником повреждения ПЗС-матрицы. Эти продукты ядерных реакций играют основную роль, так как их пробег в кремнии сравним с размерами полупроводниковых элементов высокой степени интеграции. И именно ядерные фрагменты производят очень большую ионизацию в кремнии на микронных дистанциях. Увеличение плотности твердотельных приборов, т.е. уменьшение их геометрических размеров, приводит к увеличению их чувствительности к радиации. Так как порог ядерных реакций лежит примерно в районе 10 МэВ, то опасность для ПЗС-матрицы и электроники ТВ-камеры представляют нейтроны с энергией выше 10 МэВ.

## 4. ОЦЕНКА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ЗА ЗАЩИТОЙ

Для численного сравнения вероятностей повреждения матрицы при наличии защиты и без нее можно ввести коэффициент ослабления дозы  $k$ , определяемый как отношение  $k = \frac{E_{ef}(d, E)}{E_{ef}(0, E)}$ , где

$E_{ef}(0, E)$  – эффективная доза нейтронов в точке первоначального расположения камеры (непосредственно над выходным окном ИМПС), а  $E_{ef}(d, E)$  – эффективная доза нейтронов за защитой толщиной  $d$  на расстоянии  $R$  от источника.

Расчет [5] эффективной дозы моноэнергетических нейтронов с энергией  $E$  за бетонной защитой осуществляется выражением

$$E_{ef}(d, E) = \frac{f}{R^2} \cdot h(E) \cdot B(E) \cdot \exp\left(-\frac{d}{\lambda(E)}\right),$$

где  $f$  – выход нейтронов из источника в один стерадиан;  $R$  – расстояние от источника нейтронов до точки, в которой оценивается доза;  $h(E)$  – коэффициент перехода от флюенса нейтронов к эффективной дозе;  $B(E)$  – фактор накопления нейтронов;  $\lambda(E)$  – длина ослабления дозы нейтронов в защите из обычного бетона плотностью  $2,35 \text{ г/см}^3$  при падении на нее нейтронов с энергией  $E$ . Данное выражение содержит неявное утверждение о том, что форма нейтронного спектра не меняется в защите, начиная с некоторой толщины.

Используя данные из работы [6] об угловом распределении вторичных нейтронов и среднее значение протонного тока, можно оценочно считать, что в точке установки детектора расположен виртуальный моноэнергетический источник нейтронов (ВИН) с энергией  $E = 1 \text{ МэВ}$  и эквивалентным усредненным потоком в один стерадиан  $f = 2,7 \cdot 10^8 \frac{\text{нейтр.}}{\text{с} \cdot \text{с}}$

делах углов, указанных на Рис.3 ( $120^\circ$  вверх и  $120^\circ$  вниз).

Значения остальных величин, входящих в формулу для эффективной дозы, приведены для данной энергии в [5] и [7].

Толщина бетонного пола  $d = 70 \text{ см}$ .

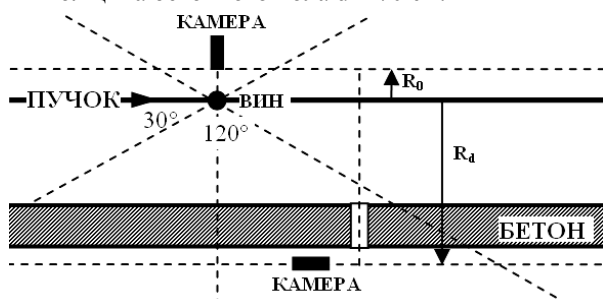


Рис.3. Геометрия эксперимента

Зная площадь ПЗСМ и параметры одного пикселя (площадь пикселя равна  $40 \text{ мкм}^2$ , толщина чувствительного слоя  $4 \text{ мкм}$ ), а также расстояние от детектора до камеры в первом ( $R_0 \approx 0,5 \text{ м}$ ) и во втором ( $R_d \approx 2,5 \text{ м}$ ) случаях, можно оценить эффективную дозу и показать, что

$$E_{ef}(0, E = 1 \text{ МэВ}) \approx 10^5 \frac{\text{нейтр.}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \approx 4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{нейтр.}}{\text{пикс} \cdot \text{с}},$$

$$E_{ef}(d, E = 1 \text{ МэВ}) \approx 25 \frac{\text{нейтр.}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \approx 10^{-5} \frac{\text{нейтр.}}{\text{пикс} \cdot \text{с}},$$

таким образом, коэффициент ослабления дозы  $k = 4000$ , т.е. установленная перископическая система позволяет, как минимум, в 4 тысячи раз снизить уровень нейтронного облучения чувствительной ПЗС-матрицы.

Отсюда, зная сечение поглощения нейтрона ядром кремния в пикселе  $\sigma_{\text{пол.}}(1 \text{ МэВ}, Si) \approx 10^{-3} \text{ барн}$  (что приводит к ядерной реакции распада ядра), оценочное число атомов кремния в пикселе  $N \approx 10^{12} \frac{1}{\text{пикс}}$  и величину нейтронного потока, можно рассчитать [8] вероятность  $P_{\text{пол.}}$  одного такого взаи-

модействия в объеме пикселя и в объеме всей ПЗС-матрицы:

$$P_{\text{пол.}}(0, E) \approx 10^{-10} \frac{1}{\text{с} \cdot \text{пикс}} \approx 10^{-4} \frac{1}{\text{с} \cdot \text{ПЗСМ}},$$

$$P_{\text{пол.}}(d, E) \approx 2 \cdot 10^{-14} \frac{1}{\text{с} \cdot \text{пикс}} \approx 3,5 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{с} \cdot \text{ПЗСМ}}.$$

Суммарное сечение упругого и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах кремния:  $\sigma_{y+n}(1 \text{ МэВ}, Si) \approx 4,5 \text{ барн}$ . В этом случае вероятности таких взаимодействий равны:

$$P_{y+n}(0, E) \approx 4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{с} \cdot \text{пикс}} \approx 0,5 \frac{1}{\text{с} \cdot \text{ПЗСМ}},$$

$$P_{y+n}(d, E) \approx 10^{-10} \frac{1}{\text{с} \cdot \text{пикс}} \approx 1,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{с} \cdot \text{ПЗСМ}}.$$

Кроме того, учитывая, что в новой конструкции ПЗС-матрица расположена не перпендикулярно к потоку нейтронов, а под острым углом к нему, то такая сборка позволяет снизить уровень засветки еще в 2-3 раза за счет уменьшения эффективной облучаемой площади ПЗСМ.

Общий эффект взаимодействия нейтронного потока с электроникой за защитой определяется как жесткой, так и мягкой компонентами нейтронного потока, которые и вызывают появление поврежденных пикселей и изменение параметров микросхем. Причем влияние мягкой компоненты усиливается из-за наличия существующего отверстия в бетонной защите. В связи с этим необходима оценка ослабления нейтронного потока с учетом имеющегося энергетического спектра распределения нейтронов и существующей геометрии всей установки.

Такая оценка была проведена при помощи адронного транспортного кода SHIELD [9]. Транспортный код SHIELD предназначен для Монте-Карло-моделирования взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями и используется для решения того же класса задач, что и программы Geant4, Fluka, MCNPX, PHITS. SHIELD моделирует перенос нейтронов с энергией  $E_n < 14,5 \text{ МэВ}$  на основе 28-групповой системы нейтронных констант БНАБ и использует следующие данные из этой системы:

- $\sigma_t$  – полное сечение;
- $\sigma_f$  – сечение деления ( $n, f$ );
- $n$  – среднее число нейтронов деления;
- $\sigma_c$  – сечение захвата ( $n, c$ );
- $\sigma_{in}$  – сечение неупругого рассеяния ( $n, n'$ ), включая реакцию ( $n, 2n$ );
- $\sigma_e$  – сечение упругого рассеяния ( $n, n$ );
- $m$  – средний косинус угла упругого рассеяния;
- $\sigma_{in}(g, g+k)$  – матрица межгрупповых переходов при неупругом рассеянии.

Нейтроны выбираются из внешнего источника, прослеживаются до окончания траектории нейтрона и могут размножаться в реакциях ( $n, 2n$ ) и ( $n, f$ ). Каждый нейтрон имеет статистический вес, а также кумулятивный таймер, в котором накапливается время, прошедшее с начала истории нейтрона. При попадании нейтрона в тепловую группу его энергия не изменяется в дальнейших столкновениях.

При численном моделировании учитывались геометрические параметры установки, и считалось, что координаты точек входа протонов в стенку ионопровода распределены равномерно вдоль направления распространения пучка (ось Z), а также равномерно по азимутальному углу в плоскости (X,Y) [10]. Угол между направлением движения протона и осью Z при входе протона в стенку трубы равен 1 мрад. Поток нейтронов на ПЗСМ вычислялся методом оценки по длине пробега. Регистрируемый объем: цилиндр высотой 20 см и радиусом 10 см.

Полученные результаты примерно втрое превышают результаты феноменологических вычислений, однако не учитывают расположения ПЗС-матрицы в пространстве и дают результат, усредненный по регистрирующему объему (Рис.4).

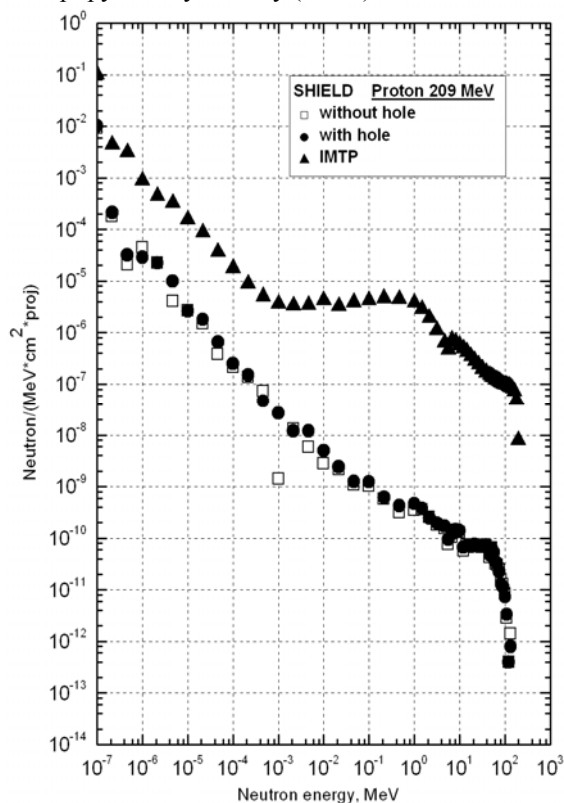


Рис.4. Результаты моделирования SHIELD

Результаты представлены в пересчете на одну первичную пучковую частицу и получены при наборе статистики  $10^7$  первичных протонов ( $E = 209$  МэВ) с учетом отражения нейтронов от бетонных стен тоннеля ЛУ (плотность  $1,9$  г/см<sup>3</sup>).

В первоначальной точке установки ИМПС полный поток равен  $2,8 \cdot 10^5$  нейтр./см<sup>2</sup>·с при средней энергии нейтронов 47 МэВ.

В точке установки ТВ-камеры за бетонной защитой полный поток равен 67 нейтр./см<sup>2</sup>·с при средней энергии нейтронов 21 МэВ.

Также для сравнения представлены результаты моделирования при отсутствии отверстия в бетонной защите. В данном случае полный поток составил бы 61 нейтр./см<sup>2</sup>·с при средней энергии нейтронов 23 МэВ.

Таким образом, можно видеть, что существующее нарушение защиты практически не влияет на конеч-

ный результат и сказывается только на небольшом усилении мягкой компоненты нейтронного потока.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение потоков оптического излучения люминесцентного экрана продемонстрировало, что при правильной установке всех оптических элементов по принципу «прожекторной» оптики нет необходимости изменять длительность экспозиции ТВ-камеры с ЗЛТ по сравнению с длительностью экспозиции при установке ТВ-камеры в 40 см от оси пучка, поскольку световой поток практически полностью сохраняется.

Повреждение пикселей говорит о том, что ПЗСМ является наиболее уязвимой составляющей частью во всем детекторе, которую необходимо защитить от воздействия радиации. Размещение местной защиты вокруг ТВ-камеры, находящейся в 40 см от оси пучка, мало изменило скорость набора повреждений, так как вторичные нейтроны, протоны и  $\gamma$ -кванты, направленные перпендикулярно оси ионопровода, попадали прямо на ПЗСМ. Следовательно, только перемещение ПЗСМ за массивную защиту позволяет использовать данную ТВ-камеру для диагностики параметров пучка.

Наблюдение в течение 72 часов последовательности изображений ПЗС-матрицы при экспозициях от 163 мкс до 1 с без пучка продемонстрировало, что пиксели, которые были горячими или теплыми при длинных экспозициях, становятся достаточно холодными при коротких. То есть, за трое суток эксплуатации ПЗСМ при высоком уровне радиации ( $\approx 10^5$  нейтр./(см<sup>2</sup>·с)) ни один из пикселей не вышел из строя полностью. Значит матрицу можно использовать на коротких экспозициях без уничтожения информации, содержащейся в поврежденных пикселях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зеркально-линзовый тракт, введенный в оборудование ИМПС, позволяет резко снизить вероятность повреждения наиболее чувствительной к радиации части электроники ИМПС – ПЗС-матрицы. Бетонная защита между ТВ-камерой и детектором ИМПС снижает поток нейтронов, падающий на ПЗСМ, примерно в  $10^4$  раз, что продлевает срок службы электроники с трех суток до, по крайней мере, гарантийного срока службы. Причем ЗЛТ передает оптическое излучение с люминофора детектора на ТВ-камеру без существенной потери потока излучения, что позволяет использовать ИМПС для измерения параметров пучка малой интенсивности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. Рейнгардт-Никулин, Ю. Калинин, С. Латушкин и др. Ионный монитор поперечного сечения протонного пучка промежуточных энергий линейного ускорителя ИЯИ РАН // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (49). 2008, №3, p.55-59.
2. В.Г. Михайлов, В.В. Леонов, В.А. Резвов и др. Многопараметрические ионизационные датчики для контроля пучков ускоренных частиц // *ПТЭ*. 1995, №6, с.39-53.

3. Г.И. Зебрев. Презентация «Проблема оценки сечений мягких сбоев от нейтронов и протонов». [http://micro.mephi.ru/groups/simulation/files/micro\\_zebrev\\_8\\_talk\\_Zebrev\\_neutr\\_NIIP\\_06.pdf](http://micro.mephi.ru/groups/simulation/files/micro_zebrev_8_talk_Zebrev_neutr_NIIP_06.pdf)
4. J. Blomgren. Nuclear data for single-event effects // *Proceedings of the enlargement workshop on neutron Measurements and Evaluations for Applications*. NEMEA. 2003, Budapest, Hungary, p.130-136.
5. В.Е. Алейников, Л.Г. Бескровная, А.Р. Крылов. *Расчет дозы нейтронов за бетонной защитой ускорителей заряженных частиц на энергии до 100 МэВ*: Препринт ОИЯИ. Р16-2002-254. Дубна, 2002.
6. V.Ju. Shegolev, B.V. Florko. The biological shielding for storage rings of NICA project // *Proceedings of RuPAC 2008*, Zvenigorod, Russia.
7. ГОСТ 25935-83. *Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров*.
8. Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. *Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов*: Учебное пособие МГИЭМ. Москва, 1998.
9. A.V. Dementyev, N.M. Sobolevsky. SHIELD - Universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and Applications // *Rad.Meas.* 1999, v.30 p.553; <http://www.inr.ru/shield/>.
10. E. Mustafin, G. Moritz, G. Walter, L. Latycheva, N. Sobolevskiy. Radiation damage to the elements of the nuclotron-type dipole of SIS100 // *Proceedings of EPAC 2004*, p.1408-1410.

*Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.*

### **PROTECTION OF IONIZATION BEAM CROSS-SECTION MONITOR ELECTRONICS FROM RADIATION DAMAGES AT INR RAS LINAC**

*S.A. Gavrilov, I.A. Vasilyev, P.I. Reinhardt-Nickoulin, N.M. Sobolevsky, A.V. Feschenko*

To measure parameters of accelerated protons beam at the output of INR linear accelerator a residual gas ionization beam cross-section monitor (BCSM), which includes a TV-camera with a CCD-matrix, is used. Interaction of the accelerated beam halo with elements of the Linac vacuum chamber leads to a neutron flux initiation, causing damages and malfunctions of the BCSM digital electronics. To resolve such problems catadioptric optical system (COS) was developed and installed at the Linac. The following describes the general organization of BCSM, COS, the discussion of the radiation background in the Linac hall and under concrete shield, as well as the evaluation of the incident neutron flux and the time of satisfactory performance of the TV-camera.

### **ЗАХИСТ ЕЛЕКТРОНІКИ ІОНІЗАЦІЙНОГО МОНІТОРА ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ПУЧКА ВІД РАДІАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НА ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ ІЯД РАН**

*С.О. Гаврилов, І.А. Васильєв, П.І. Рейнгардт-Нікулін, М.М. Соболевський, О.В. Фещенко*

Для вимірювання параметрів пучка прискорених протонів на виході лінійного прискорювача (ЛП) ІЯД РАН використовується іонізаційний монітор поперечного перерізу (ІМПП) на залишковому газі, до складу якого входить ТВ-камера з ПЗС-матрицею. Взаємодія ореолу прискореного пучка з елементами вакуумної камери ЛП призводять до виникнення потоку нейтронів, що викликають пошкодження в цифровій електроніці ІМПП. Для усунення даних проблем було розроблено та встановлено на ЛП дзеркально-лінзовий тракт (ДЛТ). Нижче наводяться: опис загальної організації ІМПП, ДЛТ, обговорення радіаційної обстановки в залі ЛП і за бетонним захистом, а також оцінка потоку нейтронів, що падає на ТВ-камеру, і часу задовільної роботи ТВ-камери.