

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-403

P13-96-403

В.В.Голиков, Г.Я.Касканов, Е.Н.Кулагин, В.В.Кухтин,  
Е.Леон Флориан\*, К.Леруа\*, В.И.Лущиков, А.П.Чеплаков,  
Е.П.Шабалин

ОБЛУЧАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ  
НА ПУЧКЕ № 3 РЕАКТОРА ИБР-2

---

\*Монреальский университет, Канада

1996

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Жидкоаргоновый адронный калориметр, создаваемый в рамках проекта RD33 /1/, предполагается установить в торцевой части детектора ATLAS на LHC /2/. Расчеты показывают, что в течение 10 лет работы в зависимости от своего расположения различные части детектора накопят гамма-дозу около  $10^5$  Гр ( $E_\gamma \sim 1+5$  МэВ) и нейтронный флюэнс быстрых нейтронов ( $E_n > 100$  кэВ) порядка  $10^{15}$  нейтронов·см<sup>-2</sup> /3/. Электроника и другие материалы, размещенные в этой зоне, должны сохранить в указанных радиационных условиях свою работоспособность без заметных искажений считываемых сигналов.

Первые экспериментальные работы по проверке радиационной стойкости GaAs-электроники для жидкоаргоновой калориметрии /4/, выполненные на импульсных источниках быстрых нейтронов ОИЯИ ИБР-2 и ИБР-30 /5/, показали, что нейтронные пучки реактора ИБР-2 и бустера ИБР-30 представляют широкие возможности для изучения радиационной стойкости различных детекторов на LHC и их элементов. Во-первых, энергетический спектр быстрых нейтронов реактора ИБР-2 соответствует спектру нейтронов, возникающему при взаимодействии протонов LHC с веществом. Во-вторых, высокая плотность потока быстрых нейтронов ( $\sim 10^{10}$  нейтронов·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> с энергией выше 100 кэВ) и большое геометрическое сечение пучков ( $\sim 800$  см<sup>2</sup>) позволяют в течение нескольких дней получить информацию об изменении характеристик элементов детекторов по мере накопления ими дозы, эквивалентной 10 годам работы детектора "ATLAS".

В данной работе приводятся основные характеристики облучательных установок ЛНФ ОИЯИ для изучения радиационной стойкости различных материалов, планируемых для использования при создании физических установок на LHC. Основное внимание уделяется описанию установки для радиационных исследований на пучке № 3 реактора ИБР-2.

Использование фильтров из карбида бора, свинца и (n,  $\gamma$ )-конвертора позволяет проводить сеансы облучения с различными соотношениями мощности дозы нейтронного и гамма-излучения. Энергетические спектры нейтронов в зоне облучения восстановлены по результатам нейтронно-активационного анализа ряда стандартных образцов. Для определения мощности доз нейтронного и гамма-излучения использованы аланиновые и термолюминесцентные дозиметры.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Реактор ИБР-2 /5/ является импульсным источником быстрых нейтронов с компактной активной зоной объемом 22 литра. Он окружен двумя слоями бетонной защиты толщиной 2,5 м каждый. Второй слой биологической защиты расположен на расстоянии 3 м от первого. Это свободное пространство (т.н. "кольцевой коридор") используется для размещения различного физического оборудования. В частности, на горизонтальном пучке № 3 располагается установка для радиационных исследований (рис.1).

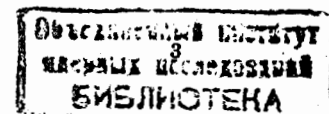
Канал № 3 в первом слое защиты реактора имеет прямоугольное сечение размерами 20×40 см<sup>2</sup>. В биологической защите имеется отверстие диаметром 1 м для ввода в кольцевой коридор в зону облучения крупногабаритных образцов, в частности, размещаемых в низкотемпературных криостатах.

Монтаж крупногабаритного оборудования для сеанса облучения проводится в экспериментальном зале в защитном боксе. В это время пучок № 3 перекрыт защитным шибром реактора ИБР-2, а отверстие в биологической защите закрыто специальной защитной пробкой. Криостат с исследуемым образцом устанавливается на специальной подвижной платформе. Для уменьшения активации оборудования тепловыми нейтронами криостат окружается слоем карбида бора толщиной 5 мм.

В зависимости от требований эксперимента перед криостатом устанавливается специальный фильтр. Для снижения уровня  $\gamma$ -излучения перед криостатом размещается слой свинца толщиной 5 см. В другом варианте с целью увеличения уровня  $\gamma$ -излучения перед криостатом устанавливается (n,  $\gamma$ )-конвертор. Конвертор представляет собой парафиновый замедлитель с кадмиевым поглотителем тепловых нейтронов общей толщиной 12 см. Кроме того, дополнительно криостат окружается слоем парафина толщиной 10 см.

В рабочем режиме платформа с установленным оборудованием вместе с подвижной защитой перемещается в кольцевой коридор при закрытом шибре пучка № 3 (рис. 1). Расстояние между поверхностью шибера и платформой составляет 10 см. Заливка криостата жидким азотом во время проведения эксперимента осуществляется дистанционно из экспериментального зала по вакуумным криопроводам, проложенным через подвижную защиту установки. Внутри этой защиты проложено также несколько трубопроводов для кабелей ввода-вывода информации о состоянии образца в течение сеанса облучения.

Облучательная установка на канале № 3 в процессе сеансов облучения крупногабаритных объектов позволяет одновременно проводить радиационные исследования с другими образцами. В этом случае капсула диаметром 130 мм



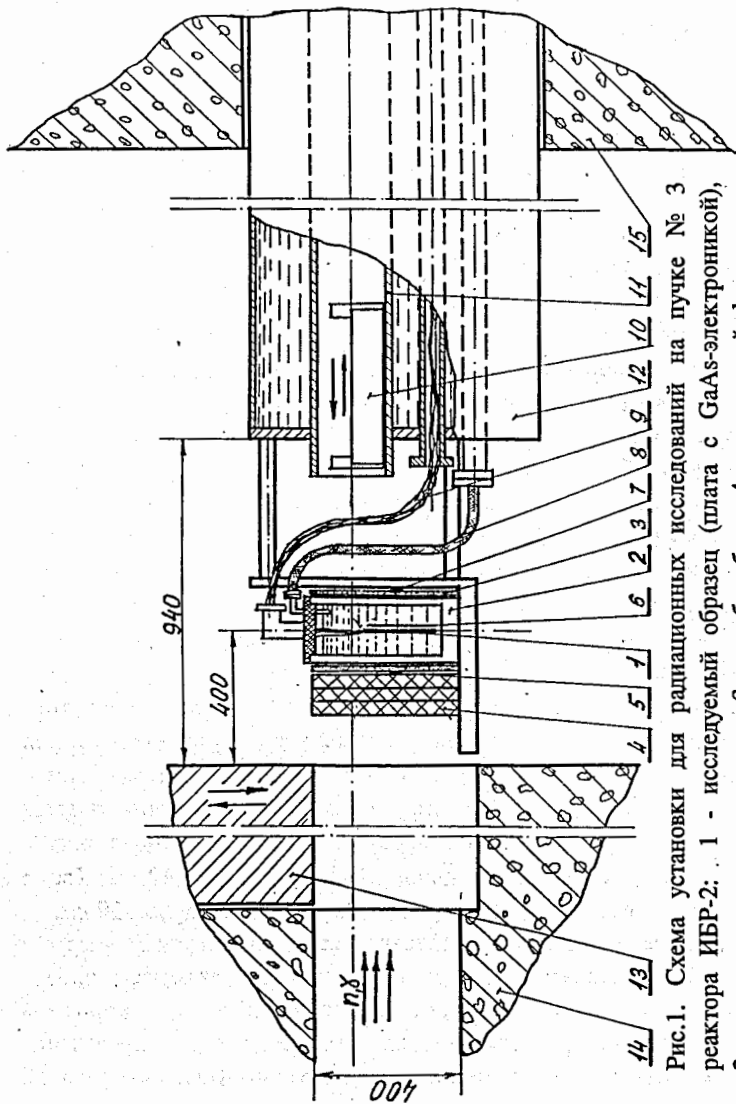


Рис.1. Схема установки для радиационных исследований на пучке № 3 реактора ИБР-2: 1 - исследуемый образец (плата с GaAs-электроникой), 2 - криостат с жидким азотом, 3 - карбид бора, 4 - свинцовый фильтр или (п,γ)-конвертор, 5,7 - нейтронные и гамма-дозиметры, 6 - дозиметр-свидетель, 8 - криогенные коммуникации, 9 - кабели ввода-вывода информации, 10 - дополнительная капсула с образцами, 11 - транспортный трубопровод, 12 - подвижная защита, 13 - защитный шибер пучка № 3, 14 - первый слой защиты реактора, 15 - биологическая защита

с исследуемыми образцами размещается в кольцевом коридоре вслед за криостатом. Максимальная длина капсулы - 800 мм. После набора заданного флюенса нейтронов капсула с образцами извлекается из зоны облучения и по транспортному трубопроводу в подвижной защите установки перемещается в экспериментальный зал в защитный бокс. Транспортный трубопровод диаметром 185 мм плавно изогнут с радиусом кривизны 30 м. Изогнутая часть трубопровода резко уменьшает фон быстрых нейтронов и γ-лучей в защитном боксе во время перемещения капсулы с образцами. Общая длина транспортного пути - 6 м. На конце изогнутого трубопровода в экспериментальном зале установлен защитный шибер длиной 1 м для уменьшения фона во время проведения облучения.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ЭНЕРГИЙ И ПОТОКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Для измерений энергетического спектра и абсолютной величины потока быстрых нейтронов использовался стандартный метод активации пороговых детекторов с последующим восстановлением исходного энергетического распределения нейтронов. Измерялся выход следующих реакций:  $In^{115}(n,n')In^{115m}$ ,  $Ni^{58}(n,p)Co^{58}$ ,  $Fe^{54}(n,p)Mn^{54}$ ,  $Ti^{46}(n,p)Sc^{46}$ ,  $Ti^{47}(n,p)Sc^{47}$ ,  $Ti^{48}(n,p)Sc^{48}$ ,  $Al^{27}(n,\alpha)Na^{24}$ . В перечисленном наборе изотопов пороговые значения реакций лежат в интервале 0,4÷6 МэВ. Минимальный порог (около 400 кэВ) имеет реакция на  $In^{115}$ , поэтому приводимые ниже экспериментальные значения потоков быстрых нейтронов относятся к интервалу энергий 0,4÷11 МэВ.

После облучения быстрыми нейтронами наведенная гамма-активность образцов измерялась германий-литиевым детектором с калиброванной эффективностью. Из анализа измеренных γ-спектров определялась  $S_\gamma$  - площадь пика γ-квантов распада с энергией  $E_\gamma$  полученных радиоактивных ядер:

$$S_\gamma = \frac{N_0 \cdot p \cdot n_i \cdot w \cdot \epsilon \cdot \tau}{A_T} \left[ (1 - e^{-t/\tau}) \cdot e^{-t_1/\tau} \cdot (1 - e^{-t_2/\tau}) \right] \int_0^\infty \Phi(E) \cdot \sigma(E) \cdot dE,$$

где  $N_0$  - число Авогадро =  $6,023 \cdot 10^{23}$ ,

$p$  - вероятность распада ядра с испусканием γ-кванта с энергией  $E_\gamma$ ,

$n_i$  - относительное содержание исследуемого изотопа в образце,

$w$  - вес образца в граммах,

$\epsilon$  - эффективность детектора,

$A_T$  - атомный вес образца,

$\tau$  - средняя продолжительность жизни произведенного изотопа в секундах,  $\tau=1,442 \times T$ , где  $T$  - период полураспада произведенного изотопа,

$t_1$  - время облучения образца,

$t_2$  - время между концом облучения и началом измерения активности образца,

$t_3$  - время измерения активности образца,

$\Phi(E)$  - дифференциальный поток нейтронов в единицах  $\text{н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{МэВ}^{-1}$ ,

$\sigma(E)$  - сечение реакции в миллибарнах,

$E$  - энергия нейтрона.

Из полученных экспериментальных значений  $\int_0^{\infty} \Phi(E)\sigma(E)dE$  и энергетической зависимости сечений  $\sigma(E)$  для каждой реакции [6] восстанавливался вид спектра  $\Phi(E)$  и рассчитывался полный поток быстрых нейтронов  $F$ . Энергетическая зависимость нейтронов  $\Phi(E)$  аппроксимировалась полиномом 2-4 порядка, умноженным на экспоненту вида  $\exp(-\alpha E)$ . Параметры аппроксимирующей функции и порядок полинома подбирались методом наименьших квадратов, при этом помимо требования наименьшей разницы между рассчитанными и экспериментальными значениями величин  $\int_0^{\infty} \Phi(E)\sigma(E)dE$  (которая, как правило, не превышала 10÷15%) принималось во внимание соблюдение ряда физически необходимых условий (например, неотрицательность потока, "сшиваемость" с законом  $1/E$  в низкоэнергетической части спектра, монотонный характер высокоэнергетической части).

На рис.2 приведены спектры быстрых нейтронов для двух вариантов конфигурации радиационного поля. При наличии перед образцом свинцового фильтра (кривая 1) поток быстрых нейтронов в интервале 0,4÷11 МэВ составляет величину  $F(0,4\div 11 \text{ МэВ}) = 9,5 \cdot 10^9 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , с (n,γ)-конвертором (кривая 2)  $F(0,4\div 11 \text{ МэВ}) = 4 \cdot 10^8 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . В последнем случае спектр быстрых нейтронов более жесткий: средняя энергия быстрых нейтронов ( $E > 0,4 \text{ МэВ}$ ) с (n,γ)-конвертором  $\bar{E} = 2,12 \text{ МэВ}$ , в то время как с фильтром из свинца  $\bar{E} = 1,54 \text{ МэВ}$ .

В данной работе спектр нейтронов в интервале энергий 0,1÷0,4 МэВ экспериментально не измерялся.

Расчеты по методу Монте-Карло показывают, что форма спектра в этом интервале энергий  $\sim 1/E$  [18]. Значение полного потока нейтронов в интервале 0,1÷0,4 МэВ оценивалось по "сшивке" с экспериментальным потоком

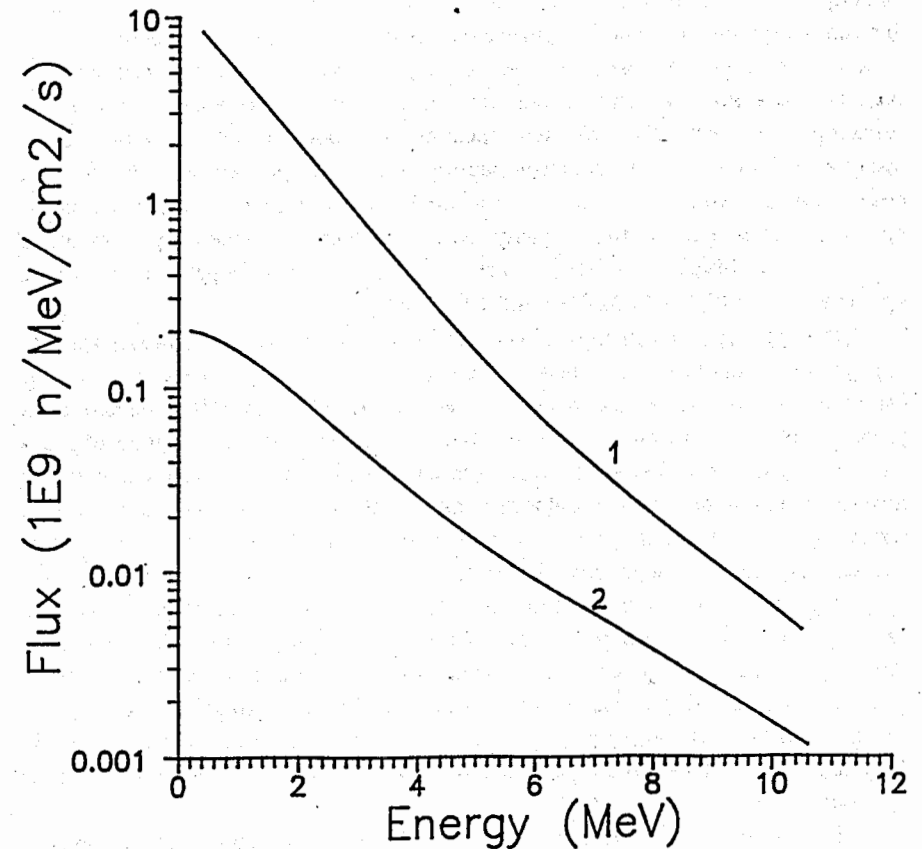


Рис.2. Дифференциальные спектры быстрых нейтронов для двух вариантов конфигурации радиационного поля: 1 - при наличии свинцового фильтра, 2 - при наличии (n,γ)-конвертора

быстрых нейтронов при  $E=0,4$  МэВ. Было получено, что после свинцового фильтра поток нейтронов с энергией  $0,1+0,4$  МэВ составляет  $\sim 30\%$  от полного потока быстрых нейтронов.

Наличие в зоне облучения исследуемого образца со своим экспериментальным оборудованием (низкотемпературный криостат, вакуумная камера, нагреватели и т.д.) может приводить как к изменению на образце вышеприведенных значений потоков быстрых нейтронов, так и их спектров. Для иллюстрации на рис.3 приведены спектры быстрых нейтронов после свинцового фильтра, измеренные в двух точках в ходе выполнения эксперимента по изучению радиационной стойкости GaAs-электроники для детектора "ATLAS" /4/. Образец представлял собой печатную плату с 40 предусилителями и усилителями-формирователями размерами  $20 \times 10$  см<sup>2</sup>, помещенную в криостат с жидким азотом диаметром 15 см (рис.1). На рис.3 кривая 1 измерена в точке сразу же за фильтром перед криостатом с  $F(0,4 + 11 \text{ МэВ}) = 9,5 \cdot 10^9$  н·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, кривая 2 измерена в точке за криостатом с  $F(0,4 + 11 \text{ МэВ}) = 4,8 \cdot 10^9$  н·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Поэтому при облучении нового образца со своим экспериментальным окружением проводится предварительное измерение значений потоков быстрых нейтронов и их спектров на самом образце. При неизменных условиях облучения или при проведении повторного сеанса в районе образца на весь цикл облучения устанавливается дозиметр-свидетель, являющийся интегральным монитором мощности реактора ИБР-2. В качестве нейтронного дозиметра используется никелевая фольга с последующим (после окончания сеанса облучения) измерением *Ge(Li)*-детектором наведенной активности  $\text{Co}^{58}$ .

Наведенная активность никелевой фольги-свидетеля была использована также для измерения однородности нейтронного потока в зоне облучения. На рис.4 показано распределение потока быстрых нейтронов по сечению печатной платы. Никелевая фольга устанавливалась в криостате с жидким азотом непосредственно за печатной платой с GaAs-электроникой /4/. Однородность потока быстрых нейтронов по сечению печатной платы составила  $\pm 5\%$ .

Для сравнения полученных в /4/ результатов по радиационной стойкости электроники на основе GaAs с результатами других исследовательских групп удобно привести измеренный нами поток быстрых нейтронов к эффективному потоку для нейтронов с энергией 1 МэВ. По определению

$$F_{\text{эфф}}(1 \text{ МэВ}) = \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} F(E) \frac{D(E)}{D(1 \text{ МэВ})} dE,$$

где  $F_{\text{эфф}}(1 \text{ МэВ})$  — эффективный поток для нейтронов с энергией 1 МэВ,  $D(E)$  - нейтронный керма-фактор для атомных смещений в GaAs,

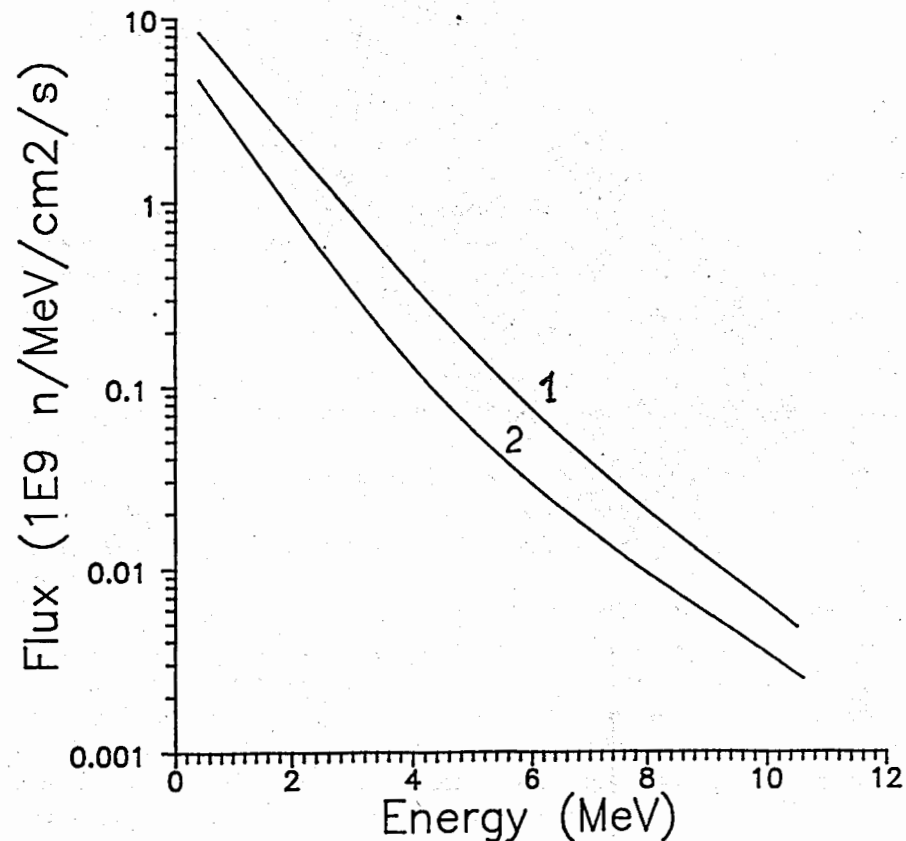


Рис.3. Дифференциальные спектры быстрых нейтронов при наличии свинцового фильтра, измеренные перед криостатом (кривая 1) и после криостата (кривая 2) в положениях 5 и 7 рис.1 соответственно

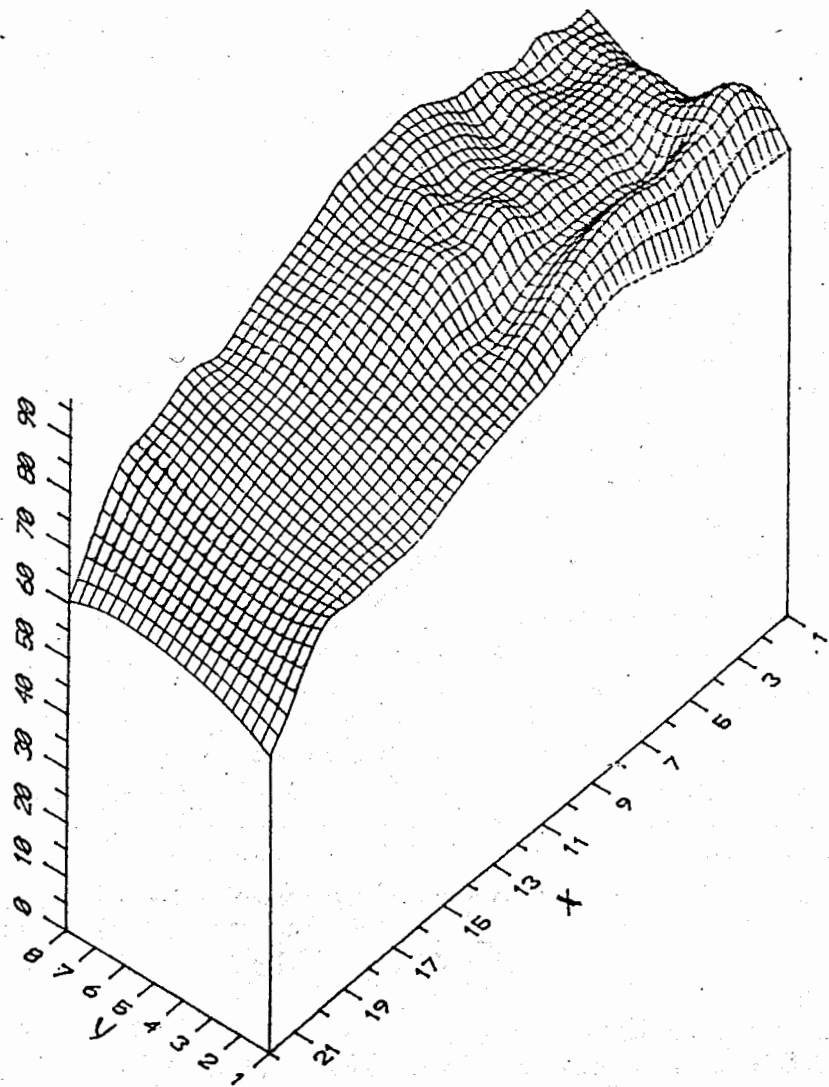


Рис.4. Распределение потока быстрых нейтронов по сечению печатной платы (в произвольных единицах). Размеры по высоте (x) и ширине (y) платы даны в см

$\bar{D}$  (1 МэВ) — усредненное значение  $D$  в районе  $E = 1$  МэВ.

Используя значения керма-фактора для смещений в GaAs из работы /7/, мы получили, что в нашей облучательной установке эффективный поток нейтронов  $F_{эфф}(1 \text{ МэВ, GaAs})$  после свинцового фильтра внутри криостата с жидким азотом равен:

$$F_{эфф}(1 \text{ МэВ, GaAs}) = 0,91F(0,1-11 \text{ МэВ}) = 8,9 \cdot 10^9 \text{ н.см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

#### 4. ГАММА-ДОЗИМЕТРИЯ

Точное определение на реакторах гамма-доз в интервале  $10^5-10^6$  Гр, представляющих интерес для радиационных исследований материалов, является непростой задачей, поскольку трудно найти гамма-дозиметры, которые были бы полностью нечувствительны к нейтронному излучению. В данной работе для измерения мощности дозы от гамма-составляющей в смешанном поле гамма-нейтронного излучения реактора ИБР-2 были использованы термолюминесцентные детекторы (ТЛД) TLD-700 фирмы "Harshaw" /9/. Широко используемые в ЦЕРН аланиновые (PAD) и радиофотолюминесцентные (RPL) дозиметры, которые позволяют измерять дозы до  $10^6$  Гр /8/, были применены для определения полных интегральных доз.

Детекторы TLD-700 на основе LiF представляют собой таблетки массой около 24 мг и размером  $3,2 \times 3,2 \times 0,9$  мм. Для уменьшения чувствительности к медленным нейтронам состав TLD-700 обогащен изотопом  $\text{Li}^7$  (99,99%  $\text{Li}^7$ , 0,01%  $\text{Li}^6$ ).

Перед облучением в поле ионизирующего излучения TLD-700 отжигали в течение 1 часа при температуре  $(400 \pm 4)^\circ\text{C}$  в кассете из титана /10/. После этого кассету с детекторами извлекали из термостата, сразу помещали в массивный радиатор из дюралюминия и охлаждали до комнатной температуры в течение 15 мин. Затем кассету с детекторами вновь помещали в термостат при температуре  $(100 \pm 2)^\circ\text{C}$  и прогревали в течение 2 часов с последующим охлаждением в радиаторе до комнатной температуры.

После описанной термической обработки проводилось либо облучение ТЛД в поле гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  дозой  $10^{-2}$  Гр на стандартной градуировочной установке для вычисления градуировочного коэффициента, либо облучение в исследуемых полях ионизирующего излучения. Измерения облученных детекторов проводились на приборе фирмы "Harshaw" модели 2000(A+B), реализующем интегральный метод измерения термолюминесцентных сигналов (ТЛС). По записанным кривым термического высвечивания были выбраны режим нагрева планшета прибора и период

интегрирования ТЛС детекторов таким образом, чтобы остаточный сигнал составлял не более 0,5% от полного. Все измерения ТЛД проводились в следующем режиме:

- температура предварительного быстрого нагрева  $T_1=100^\circ\text{C}$ ,
- начальная температура интегрирования ТЛС  $T_2=100^\circ\text{C}$ ,
- максимальная температура нагрева  $T_3=280^\circ\text{C}$ ,
- скорость линейного нагрева от  $T_1$  до  $T_3$  равна 10 К/с,
- продолжительность измерения  $t=30$  с.

В процессе измерения камера блока прибора 2000А продувалась техническим азотом со скоростью истечения (3+4) л/мин.

Как известно [11,12], при гамма-дозах выше 1 Гр в ТЛД наблюдается так называемое явление "сверхлинейности", т.е. нелинейный рост выхода ТЛС с увеличением гамма-дозы. Доза, при которой начинает наблюдаться это явление, варьируется при различных способах приготовления ТЛД. "Сверхлинейность" также зависит от энергии падающих  $\gamma$ -квантов, увеличиваясь для больших энергий.

Зависимость выхода ТЛС детекторов TLD-700 от величины дозы была предварительно исследована в полях моноэнергетического гамма-излучения  $\text{Cs}^{137}$  ( $E_\gamma=0,66$  МэВ) и  $\text{Co}^{60}$  ( $E_{\gamma 1}=1,17$  МэВ;  $E_{\gamma 2}=1,33$  МэВ) в интервале доз от 1 до  $5 \cdot 10^3$  Гр. Полученные результаты приведены на рис.5 (кривые 1 и 2 соответственно). На этом же рисунке даны также данные, полученные на описанной облучательной установке реактора ИБР-2 (кривая 3), где поле  $\gamma$ -излучения имеет довольно широкий спектральный состав. На данный момент не проведены детальные измерения спектра  $\gamma$ -квантов на реакторе ИБР-2. Однако, используя экспериментальные данные по энергетическому распределению потока  $\gamma$ -излучения на установке ИБР-30 [13], можно утверждать, что  $\gamma$ -спектр помимо  $\gamma$ -излучения самого реактора в значительной степени связан с  $\gamma$ -излучением после захвата нейтронов в материалах защиты реактора, имеет среднюю энергию  $1,5 \pm 2$  МэВ и высокоэнергетический хвост до 10 МэВ.

При получении экспериментальных данных (рис.5) детекторы TLD-700 устанавливались в одно и то же место используемой установки. Величина дозы регулировалась временем экспозиции ТЛД в измеряемом поле  $\gamma$ -излучения. Абсолютное значение мощности дозы определялось из показаний TLD-700 при значениях  $\gamma$ -дозы  $< 1$  Гр (при линейном законе измерения роста выхода ТЛД со временем экспозиции). Дополнительно абсолютные значения  $\gamma$ -дозы в интервале 20-200 Гр измерялись образцовыми ферросульфатными дозиметрами Фрике [14]. Экспериментальные значения мощности  $\gamma$ -дозы,

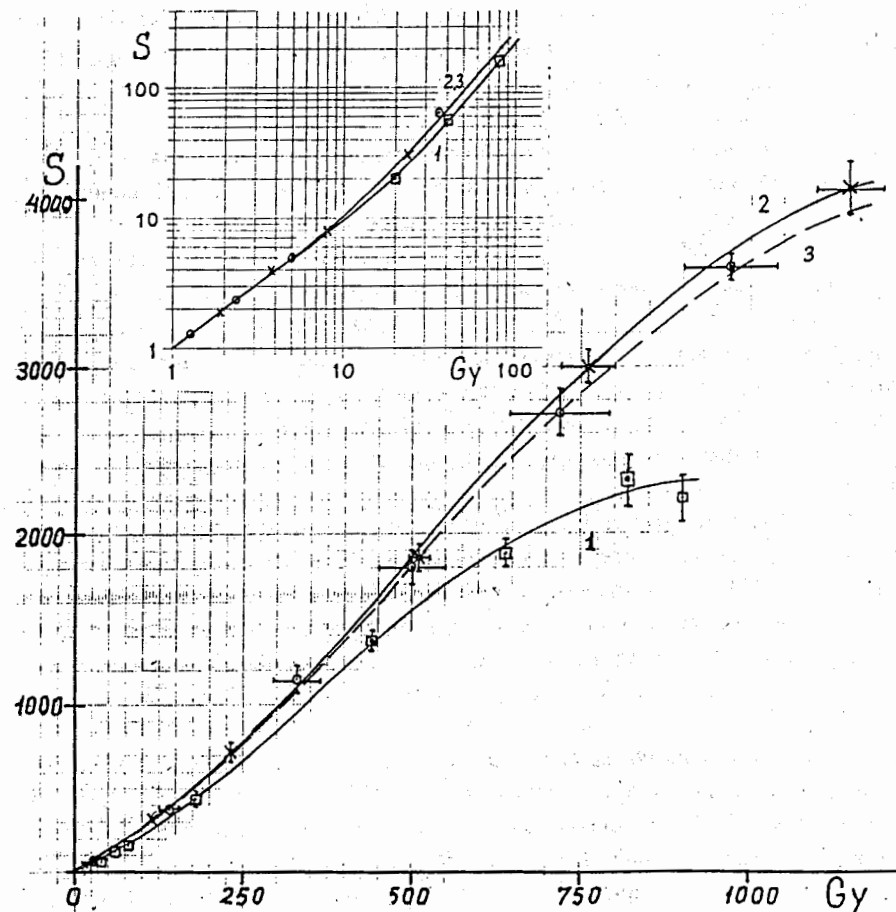


Рис.5. Зависимость выхода термолуминесцентного сигнала (ТЛС) детекторов TLD-700, отн. ед., от дозы и энергии гамма-излучения.  $\square$ - $\square$ - $\square$  - источник  $\text{Cs}^{137}$ (1); x-x-x - источник  $\text{Co}^{60}$ (2); 0-0-0-канал № 3 реактора ИБР-2 (3)

даваемые TLD-700 и дозиметрами Фрике, совпадали между собой с точностью 5+10% для всех использованных облучательных установок.

Анализ экспериментальных данных (рис.5) показывает, что для "мягких"  $\gamma$ -квантов  $Cs^{137}$  явление "сверхлинейности" TLD-700 проявляется при дозах >20 Гр и максимальное отклонение от линейности (~3 раза) наступает при дозах 400+600 Гр. Для более жестких  $\gamma$ -квантов  $Co^{60}$  и  $\gamma$ -спектра реакторного излучения экспериментальные данные практически совпадают друг с другом: в обоих случаях явление "сверхлинейности" наступает уже при дозах > 10 Гр и достигает максимального отклонения от линейности (3,5+4 раза) при дозах 300+1000 Гр. В дальнейшем градуировочная кривая 3 (рис.5) использовалась для определения из показаний TLD-700 мощности  $\gamma$ -дозы при проведении сеансов облучения на реакторе ИБР-2.

В ряде экспериментов на облучательной установке для измерения интегральной полной дозы использовались полученные из ЦЕРН аланиновые (PAD) и радиофотолюминесцентные (RPL) дозиметры.

Принцип работы аланинового дозиметра /8,15,16/ основан на образовании под действием ионизирующего излучения парамагнитных центров в  $\alpha$ -аминокислоте ( $CH_3CNH_2-COOH$ ). Образующиеся из-за разрушения углеродных ковалентных связей неспаренные электроны регистрируются спектрометром электронного парамагнитного резонанса. Используемые в данной работе дозиметры, носящие имя "Elsugau," имели диаметр 4,8 мм и длину 30 мм и состояли из однородной смеси полимера и аланина (33% - 67% по весу).

В RPL-дозиметрах /8,17/ под действием излучения создаются центры фотолюминесценции, содержащие атомы и ионы серебра. Последующее освещение RPL-дозиметра ультрафиолетовым светом вызывает видимую люминесценцию. Используемые в данной работе RPL-дозиметры типа DOS-2 фирмы "Schott" были длиной 6 мм и диаметром 1 мм и имели следующий состав (по весу): O-53,7%; P-33,4%; Al-4,6%, Ag-3,7%, Li-3,7%, B-0,9%.

После облучения обмер аланиновых (PAD) и RPL-дозиметров проводился в Лаборатории дозиметрии больших доз ЦЕРН (High Level Dosimetry Laboratory at CERN) с использованием спектрометра VARIAN-E3 ESR (для аланина) и прибора "Toshiba FGD-6" (для RPL) /8/.

В таблицах 1 и 2 приведены экспериментальные значения мощности доз при использовании на облучательной установке перед образцом соответственно свинцового фильтра или (n, $\gamma$ )-конвертора. Для иллюстрации влияния образца приведены также мощности доз после криостата, полученные в конкретных условиях эксперимента по изучению радиационной стойкости

Таблица 1

Мощность дозы (Гр/ч) после свинцового фильтра

	Перед криостатом	За криостатом
$D_T^{TLD}$		$48 \pm 8$
$D_{total}^{PAD}$	$1164 \pm 16$	$435 \pm 3$
$D_1$	$886 \pm 90$	$387 \pm 40$
$D_2$	$240 \pm 20$	$31 \pm 5$
$D_T^{PAD}$		$25 \pm 37$
$D_{total}^{RPL}$	$759 \pm 60$	$195 \pm 27$

Таблица 2

Мощность дозы (Гр/ч) после (n, $\gamma$ )-конвертора

	Перед криостатом	За криостатом
$D_T^{TLD}$	$466 \pm 40$	$170 \pm 10$
$D_{total}^{PAD}$	$627 \pm 19$	$216 \pm 4$
$D_1$	$58 \pm 10$	$25 \pm 4$
$D_2$	$10 \pm 2$	$4 \pm 1$
$D_T^{PAD}$	$559 \pm 22$	$187 \pm 9$
$D_{total}^{RPL}$	$673 \pm 89$	$226 \pm 51$



GaAs-электроники /4/. Последние данные могут служить также ориентиром при планировании проведения радиационных исследований с образцами диаметром 130 мм в транспортной капсуле одновременно с сеансом облучения крупногабаритных объектов.

Пространственное распределение мощности  $\gamma$ -дозы по наружной поверхности цилиндрического криостата (рис.1) измерялось детекторами TLD-700. После свинцового фильтра  $\gamma$ -доза оказалась в пределах 15% однородной по объему облучения. Поэтому в таблице 1 приведено усредненное значение показаний TLD-700  $D_{\gamma}^{TLD}$ .

Помимо экспериментальных данных по полной дозе  $D_{total}^{PAD}$ , измеренной аланином, в таблицах приведены расчетные значения вклада в полную дозу  $D_1$  и  $D_2$  нейтронов различных энергий. Величины  $D_1$  и  $D_2$  рассчитаны из следующих соотношений:

$$D_1 = \int_{0,4 \text{ МэВ}}^{11 \text{ МэВ}} K(E)\Phi(E)dE, \quad D_2 = \int_{0,03 \text{ МэВ}}^{0,4 \text{ МэВ}} K(E)\Phi(E)dE,$$

где  $\Phi(E)$  - дифференциальный поток нейтронов,  
 $K(E)$  - керма-фактор аланина /8/.

После свинцового фильтра основной вклад в полную дозу  $D_{total}^{PAD}$  вносят нейтроны (>96%), при этом определяющими являются быстрые нейтроны с энергией > 0,4 МэВ. Вклад нейтронов в интервале энергий 30-400 кэВ составляет порядка 20%, а роль нейтронов меньших энергий практически пренебрежима.

При наличии (n, $\gamma$ )-конвертора ситуация резко меняется. Основной вклад в полную дозу  $D_{total}^{PAD}$  вносят  $\gamma$ -кванты (> 85%). В формировании поля  $\gamma$ -излучения в районе расположения криостата значительную роль играет (n, $\gamma$ )-конвертор, поэтому наблюдается заметный градиент  $\gamma$ -дозы при удалении от поверхности (n,  $\gamma$ )-конвертора. В то же время по данным детекторов TLD-700 по вертикали сохраняется однородность  $\gamma$ -поля в пределах 6%.

В целом как при свинцовом фильтре, так и при (n, $\gamma$ )-конверторе после вычитания нейтронного вклада в полную дозу  $D_{total}^{PAD}$  наблюдается удовлетворительное согласие величины  $\gamma$ -дозы между TLD-700 и аланином.

В условиях интенсивного нейтронного поля (в данном эксперименте после свинцового фильтра) основной вклад в показания RPL-дозиметров вносят тепловые нейтроны за счет реакций захвата нейтронов в материале детектора. Эти реакции ( $Li^6(n,\alpha)T^3$ ;  $B^{10}(n,\alpha)Li^7$ ,  $Ag(n,\gamma)$ ) идут как с выделением заряженных частиц, так и  $\gamma$ -квантов и обладают большими сечениями поглощения медленных нейтронов. Подробный анализ показаний RPL-дозиметров выходит за рамки данной работы. Укажем только, что при

наличии (n, $\gamma$ )-конвертора в условиях сильного ослабления исходного нейтронного поля показания RPL-дозиметров приближаются к показаниям PAD и TLD-700.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная установка позволяет проводить широкий круг исследований радиационной стойкости различных материалов площадью 800 см<sup>2</sup> в широком интервале температур. Для проведения облучений используются два варианта конфигурации радиационного поля. В первом варианте радиационное поле преимущественно обуславливается быстрыми нейтронами, поток которых с энергией более 100 кэВ равен  $1,4 \cdot 10^{10}$  н·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Первичное  $\gamma$ -излучение поглощается свинцовым фильтром, за счет которого доза  $\gamma$ -излучения уменьшается до уровня 50 Гр·ч<sup>-1</sup>, что составляет менее 4% от полной дозы радиационного поля.

Во втором варианте поток быстрых нейтронов ослабляется (n, $\gamma$ )-конвертором и радиационное поле преимущественно создается как первичным  $\gamma$ -излучением самого реактора, так и  $\gamma$ -квантами от захвата нейтронов кадмием. Поток быстрых нейтронов составляет  $\sim 4 \cdot 10^8$  н·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, а мощность  $\gamma$ -дозы  $\sim 500$  Гр·ч<sup>-1</sup>, что составляет более 85% от полной дозы радиационного поля.

В обоих вариантах радиационного поля тепловые нейтроны подавляются фильтром из карбида бора.

На установке проведены первые экспериментальные работы по проверке радиационной стойкости различных элементов детектора "ATLAS" на LHC.

Авторы выражают искреннюю признательность Отделению радиационных и радиобиологических исследований ОИЯИ за предоставление дозиметров TLD-700; М. Тавлету из ЦЕРН за предоставление и измерения аланиновых и RPL-дозиметров.

### Литература

- /1/. ATLAS Collaboration, Technical Proposal. CERN/LHCC/94-43 (1994).
- /2/. RD33 Collaboration, C. Berger et al. Nucl.Instr.&Methods, A357, 333 (1995).
- /3/. G.R. Stevenson, in CERN 90-10 ECFA 90-133, [ed. G. Jarlskog, D. Rein, 1990], p.566.
- /4/. J. Ban, V. Bartheld, H. Brettel, A. Cheplakov et al. JINR Communications, E13-95-222, MPI-PhE/95-08, Dubna, 1995.
- /5/. E. Shabalin, Fast Pulsed and Burst Reactors, [Pergamon Press Ltd., Oxford, 1979].
- /6/. V. McLane, Ch.L. Dunford, Ph.F. Rose. Neutron Cross Section, v.2, [Academic Press, Inc., USA, 1988].
- /7/. A.M. Ougouag et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., NS-37, 2219 (1990).
- /8/. E. Leon Florian, H. Schönbacher and M. Tavlet. CERN/TIS - CFM/IR/93-03 (1993).
- /9/. Проспект фирмы Harshaw Chemical Co., Cleveland, Ohio 44106, USA.
- /10/. Г.Я. Касканов, М.М. Комочков. Сообщение ОИЯИ, 16-83-452, Дубна, 1983.
- /11/. К.К. Шварц, З.А. Грант и др. "Термолюминесцентная дозиметрия" Издательство "Зинатне", Рига, 1968.
- /12/. F.M. Gayton, J.R. Harvey, J.N. Jackson. J.Brit.Nucl.Energy, 11, 125 (1972).
- /13/. В.А. Хитров, Пак Хон Чер "Спектральное распределение выхода гамма-излучения из реактора ИБР-30". Отчет ЛНФ ОИЯИ, Дубна, 1974.
- /14/. К.К.Аглинцев "Дозиметрия ионизирующих излучений", Гостехиздат, М., 1957.
- /15/. F. Coninckx., H. Schönbacher. Appl.Radiation and Isotopes, 44, 67 (1993).
- /16/. F. Coninckx., H. Schönbacher et al. Appl.Radiation and Isotopes, 40, 977 (1989).
- /17/. M. Coche et al. CERN TIS Commision Report TIS - RP/205 (1988).
- /18/. В.Ф. Переседов, А.Д. Рогов. Краткие сообщения ОИЯИ, № 1 (75) - 96, 69, 1996.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 октября 1996 года.

Источники (где было опубликовано)		и иностранные	У	П
--------------------------------------	--	---------------	---	---

Голиков В.В. и др.

P13-96-403

Облучательная установка крупногабаритных объектов на пучке № 3 реактора ИБР-2

Приводятся основные характеристики облучательной установки на пучке № 3 реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. Установка позволяет проводить широкий круг исследований радиационной стойкости различных объектов площадью до 800 см<sup>2</sup> как при криогенных, так и при комнатной температурах. Энергетические спектры нейтронов в зоне облучения восстановлены из измерений активации пороговых детекторов. Для определения мощности доз нейтронного и гамма-излучения использованы аланиновые и термолюминесцентные дозиметры. Использование фильтров из карбида бора, свинца и (n,γ)-конвертера позволяет проводить сеансы облучения с различными соотношениями мощности дозы нейтронного и гамма-излучения. При свинцовом фильтре поток быстрых нейтронов с энергией более 0,1 МэВ равен  $1,4 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а нейтронная доза составляет более 96 % от полной дозы радиационного поля. При (n,γ)-конвертере мощность гамма-дозы 500 Гр/ч, что составляет более 85 % от полной дозы радиационного поля. На установке проведены первые экспериментальные работы по проверке радиационной стойкости GaAs-электроники детектора «ATLAS» на LHC.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им.И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Golikov V.V. et al.

P13-96-403

Large-Scale Samples Irradiation Facility at the IBR-2 Reactor

The description of the irradiation facility at the beam line no.3 of the IBR-2 reactor of the Frank Laboratory for Neutron Physics is presented. The facility is dedicated to the irradiation studies of various objects up to 800 cm<sup>2</sup> both at cryogenic and room temperature. The energy spectra of neutrons were reconstructed by the method of threshold detectors activation. The neutron fluence and γ doses rates were measured by means of alanine and thermoluminescent dosimeters. The boron carbide and lead filters or (n/γ) converter provide one with beams of different ratio of the doses induced by the neutrons and photons. For the lead filter the flux of fast neutrons with the energy more than 0.1 MeV is  $1.4 \cdot 10^{10} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and the neutron dose is about 96 % of the total dose of the radiation field. For the (n/γ) converter, the γ dose rate is  $\sim 500 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  which provides about 85 % of the total dose. The radiation hardness tests of GaAs electronics and materials for the ATLAS detector at the Large Hadron Collider (LHC) were performed at this facility.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996