

РЗ-2017-55

М. В. Булавин, А. Е. Верхогляд, Е. Н. Кулагин,  
С. В. Афанасьев, Н. И. Замятин, А. И. Шафроновская

**НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
НЕЙТРОННОГО ПОТОКА НА ПУЧКЕ № 3 ИБР-2  
НА ЗНАЧИТЕЛЬНОМ УДАЛЕНИИ ОТ РЕАКТОРА**

Булавин М. В. и др.

P3-2017-55

Некоторые физические характеристики нейтронного потока на пучке № 3 ИБР-2 на значительном удалении от реактора

Приводятся результаты измерений плотности потока быстрых нейтронов методом нейтронного активационного анализа (НАА) и измерений эквивалентного 1 МэВ флюенса по радиационным повреждениям кремниевых детекторов (Si-detectors), а также  $\gamma$ -дозы с использованием пленок-мониторов на значительном удалении (3–8 м) от водяного замедлителя ВЗ-303 ИБР-2 на экспериментальном пучке № 3. Полученные результаты можно использовать для определения координат применяемых образцов на установке для радиационных исследований пучка № 3 с целью облучения их в диапазоне значений флюенса от  $\sim 5 \cdot 10^{11}$  до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  (или с плотностью потока от  $\sim 10^5$  до  $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Bulavin M. V. et al.

P3-2017-55

Some Physical Parameters of the Neutron Flux on IBR-2 Beamline No. 3 at a Considerable Distance from the Reactor

The current paper covers results of the measurements of the fast neutron flux density by the method of neutron activation analysis (NAA) and measurements of the fluence equivalent to 1 MeV on the radiation damages of silicon detectors (Si-detectors), as well as  $\gamma$ -doses with usage of film-monitors at a considerable distance (3–8 m) from the IBR-2 water moderator WM-303 on the experimental beamline No. 3. The results obtained can be used for determining the coordinates of the samples installed on the radiation research facility for beamline No. 3 aimed at their irradiation within the range of fluences from  $\sim 5 \cdot 10^{11}$  to  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (or with the flux density from  $\sim 5 \cdot 10^5$  to  $10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение полупроводниковых (п/п) детекторов в экспериментальной физике в условиях радиации (создаваемый фон в области детектора или прямые пучковые частицы, проходящие через детектор) требует знания физических эффектов, приводящих к деградации основных параметров п/п материала (Si, Ge, C, GaAs, InSb (AlB5) и др.) и параметров самих детекторов. Радиационные повреждения кристаллической решетки п/п материала образуют в запрещенной ( $\Delta E_{33}$ ) зоне энергий электрически активные уровни — глубокие центры (ГЦ), которые являются центрами термогенерации и рекомбинации носителей заряда. ГЦ уменьшают время жизни носителей заряда, что приводит к увеличению объемного тока детектора (растет шум и мощность рассеяния на детекторе) и к уменьшению эффективности сбора заряда (падает амплитуда сигнала). Для кремниевых детекторов также важным эффектом при облучении является изменение удельного электрического сопротивления в объеме детектора, которое требует в процессе эксплуатации детектора проводить коррекцию рабочего напряжения.

Самое широкое применение для создания координатных детекторов (внутренняя трековая система и вершинный детектор) в экспериментах на LHC получили микростриповые и микропиксельные кремниевые (Si) детекторы. Активная площадь таких координатных систем достигает  $200 \text{ м}^2$  и десятков миллионов электронных каналов регистрации (CMS). Проблеме радиационных повреждений п/п детекторов (особенно кремниевых) для применения в условиях экспериментов на LHC посвящено огромное количество научных публикаций. Работы по исследованию радиационной стойкости п/п детекторов постоянно продолжаются, так как меняются радиационные условия (увеличивается светимость LHC), а также топология и технология детекторов. На основании полученных экспериментальных результатов по изучению эффектов радиационных повреждений детекторов для условий конкретного эксперимента можно составить прогноз деградации во времени (по сценарию работы данного эксперимента) основных параметров детекторов и определить продолжительность их жизни — время, в течение которого параметры детекторов позволяют делать набор физических данных с необходимой точностью и разрешением.

Изменение электрических, физических и механических свойств различных детекторных материалов (Si, поли- и монокристаллы алмаза, GaAs, печатные платы из арлона и полиимида, измерители магнитного поля — 3D-зонды с холловскими сенсорами) при облучении нейтронами вызывает большой интерес в том случае, когда речь заходит о прогнозировании радиационной стойкости и изменении электрических и физических свойств данных материалов во время их длительной эксплуатации и работающих на их основе приборов или непосредственно самих детекторов.

Прогнозирование радиационной стойкости материалов и детекторов (Si, поли- и монокристаллы алмаза, GaAs, печатные платы из арлона и полиимида, измерители магнитного поля на основе 3D-зондов с холловскими сенсорами) является весьма актуальным вопросом для двух главных экспериментов Большого адронного коллайдера (LHC) — ATLAS и CMS в рамках проведения их модернизации [1]. Период «жизни» детекторных материалов, входящих в состав ATLAS и CMS, — примерно 10 лет. Максимальный суммарный флюенс нейтронов за это время может достигать величины  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . В течение этого времени под воздействием сильных полей ионизирующих излучений электронные свойства детекторов ухудшаются (растет шум детектора, повышается ток утечки, падает эффективность сбора заряда (сигнал), изменяется удельное электрическое сопротивление в объеме детектора, изменяется рабочее напряжение [2]), вплоть до выхода приборов из строя. Меняются механические свойства материалов, возрастает наведенная активность, что также заставляет уделять особое внимание проблемам радиационной безопасности персонала при замене комплектующих материалов детекторов ATLAS и CMS после окончания десятилетнего срока их эксплуатации.

Измерение и контроль с высокой точностью величины магнитных полей в экспериментальных ядерных установках типа токамак является необходимым условием работы этих устройств. Поэтому прогноз стабильности и безотказности работы сенсоров магнитного поля в термоядерном реакторе ITER — важная задача. Радиационно стойкие полупроводниковые сенсоры магнитного поля должны сохранять свою работоспособность в условиях «высокого» флюенса нейтронов ( $\Phi > 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ), который будет накоплен за время работы реактора ITER ( $\sim 20$  лет) [3]. Для исследований радиационной стойкости измерителей магнитного поля требуются высокие значения флюенса ( $\Phi > 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ), в то же время есть много задач, где исследования надо проводить в диапазоне не самых больших значений, например, для п/п детекторов это область значений флюенса быстрых нейтронов обычно от  $10^{10}$  до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Возможность проводить одновременно облучение исследуемых образцов в большом динамическом диапазоне значений флюенса за один цикл (11 сут) работы реактора была достигнута на установке для радиационных исследований ИБР-2 [5]. Это позволяет делать облучение образцов для нескольких исследовательских групп в одном цикле реактора. Установка

позволяет получить максимальное значение флюенса нейтронов до  $10^{18} \text{ см}^{-2}$  в точках расположения исследуемых образцов за один цикл работы реактора ИБР-2, который равен 11 сут [6].

Эксперименты с «высоким» значением флюенса нейтронов проводятся на прямом участке установки для радиационных исследований, который при облучении может находиться вблизи активной зоны реактора на минимальном расстоянии 40 мм. При этом исследования радиационной стойкости образцов, требующих «малых» флюенсов нейтронов, на установке для радиационных исследований ранее не проводились по причине отсутствия информации о спектре и плотности потока нейтронов внутри изогнутого участка установки, находящегося на значительном удалении (от 3 до 8 м) от активной зоны. Поэтому в данной работе были проведены первые эксперименты по определению плотности потока быстрых нейтронов (без определения всего спектра) и дозы  $\gamma$ -облучения на изогнутом участке установки, который находится на удаленном расстоянии от активной зоны. Измерения плотности потока быстрых нейтронов проводили в нескольких точках двумя методами: методом стандартного нейтронно-активационного анализа на германиевом спектрометре [7] с использованием никелевых «спутников» и методом, основанным на использовании кремниевых планарных детекторов [8].

## 1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Установка состоит из двух частей: прямого участка и изогнутого участка, который расположен практически сразу за прямым и представляет собой изогнутую трубу из нержавеющей стали (рис. 1).

Прямой участок установки (5) находится ближе всего к поверхности водяного замедлителя (ВЗ-303 ИБР-2) у активной зоны со стороны пучка №3 реактора и представляет собой несущую конструкцию в виде двутавра из сплава АМг6 длиной 3 м. Максимальное значение плотности потока быстрых нейтронов (с энергией более 0,4 МэВ), равное  $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , достигается при расположении конца двутавра (3) на минимально возможном расстоянии (около 40 мм) от поверхности ВЗ-303 (2). При этом значение флюенса быстрых нейтронов за один стандартный реакторный цикл, равный 11 сут, доходит до  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . При перемещении исследуемых образцов по всей длине двутавра или всей установки относительно активной зоны значение плотности потока быстрых нейтронов будет изменяться от  $10^{12}$  до  $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а значение флюенса — от  $10^{18}$  до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  [6].

Труба изогнутого участка (6) с внутренним диаметром 160 мм имеет длину 4,8 м и радиус кривизны 25 м. Труба находится внутри цилиндра (8) с внешним диаметром 800 мм, заполненного водой, который играет роль биоло-

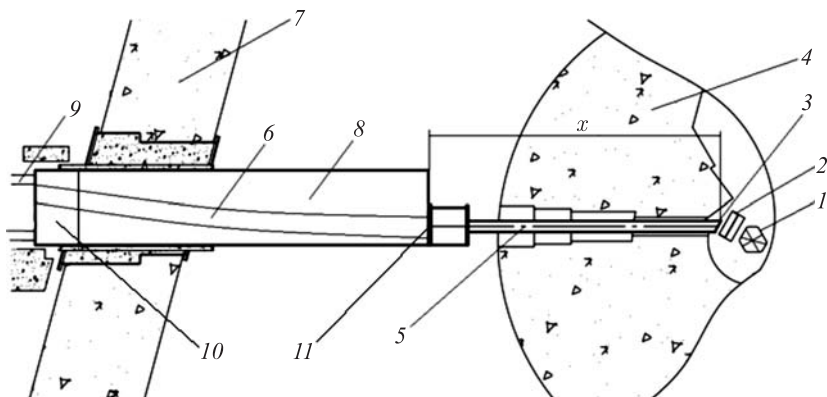


Рис. 1. Схема установки для радиационных исследований на пучке №3 ИБР-2: 1 — активная зона ИБР-2; 2 — водяной замедлитель ВЗ-303; 3 — конец прямого участка (двухавра) для установки исследуемых образцов; 4 — первая биологическая защита; 5 — прямой участок установки ( $x = 3$  м); 6 — изогнутый участок установки (труба длиной 4,87 м); 7 — вторая биологическая защита; 8 — стальной цилиндр с водой; 9 — рельсовый путь; 10 — шибер; 11 — начальная точка изогнутой трубы

гической защиты. Конец цилиндра оборудован специальным шибером (10) толщиной около 1 м, который перекрывает трубу и используется для защиты от прямого пучка нейтронов и  $\gamma$ -излучения во время облучения образцов. При неработающем реакторе шибер открывается и появляется доступ к изогнутой трубе для установки образцов.

Ближняя (начальная) к активной зоне точка трубы (11) при расположении установки на минимально возможном расстоянии от ВЗ-303, равном 40 мм,

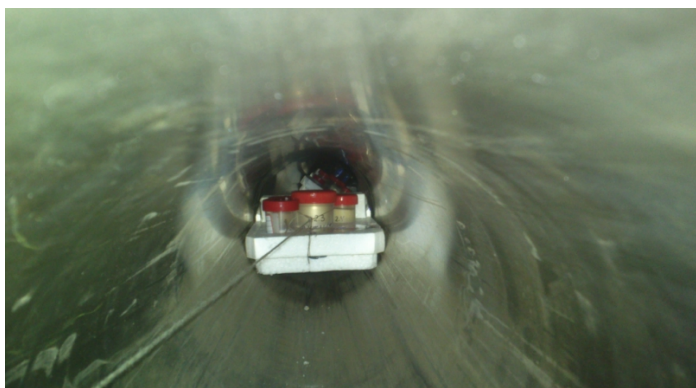


Рис. 2. Расположение группы образцов в изогнутой трубе облучательной установки

находится на расстоянии около 3 м, дальняя — 7,8 м. Образцы для исследований устанавливаются посередине специальных центрирующих дисков или на толстых подложках, расположенных внутри трубы, таким образом, чтобы их поверхность была перпендикулярна нейтронному пучку (см. рис. 2).

## 2. ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Облучение образцов проводили при двух разных расстояниях от конца прямого участка до водяного замедлителя: 0,16 м и 0,5 м. Таким образом, самый ближний к водяному замедлителю образец в изогнутой трубе располагался на расстоянии 3,16 м от него, а самый дальний — на расстоянии 8,3 м. Никелевые спутники, кремниевые планарные детекторы и  $\gamma$ -дозиметры были установлены внутри трубы на различном расстоянии друг от друга в сторону удаления от активной зоны до конца трубы (до начала шибера 10, рис. 1).

Плотность потока быстрых нейтронов с энергией  $E > 1$  МэВ определяли двумя методами:

— нейтронно-активационным анализом с измерением спектра после облучения никелевого спутника на германиевом детекторе (реакция захвата  $\text{Ni}^{57} + n^0 \rightarrow \text{Co}^{58} + \gamma(811 \text{ кэВ})$ );

— с помощью планарных кремниевых детекторов, у которых обратный темновой ток линейно зависит от флюенса быстрых нейтронов.

Приращение обратного объемного тока, получаемое в результате облучения кремниевого детектора, линейно зависит от флюенса нейтронов, чувствительного объема детектора и выражается следующей эмпирической зависимостью:

$$\Delta I = \alpha_I \cdot \Phi \cdot V, \quad (1)$$

где  $\Delta I = I - I_0$  (А) — измеренное приращение темнового обратного тока детектора после облучения,  $I_0$  — ток детектора до облучения при напряжении полного обеднения, приведенный к температуре  $+20^\circ\text{C}$ ,  $I$  — ток детектора после облучения при напряжении полного обеднения, приведенный к температуре  $+20^\circ\text{C}$ ;

$\Phi$  ( $\text{см}^{-2}$ ) — эквивалентный по повреждениям кремния флюенс быстрых нейтронов с энергией 1 МэВ;

$\alpha_I = (5 \pm 0,5) \cdot 10^{-17}$  (А/см) — токовая константа повреждений кремния для быстрых нейтронов с энергией 1 МэВ, приведенная к температуре  $+20^\circ\text{C}$  без учета самоотжига;

$V = d \cdot S$  ( $\text{см}^3$ ) — чувствительный объем детектора при напряжении полного обеднения,  $d$  — толщина (см) детектора (известна и измеряется с высокой точностью),  $S$  — активная площадь ( $\text{см}^2$ ) детектора (площадь  $p$ - $n$ -перехода, известна с высокой точностью из топологии детектора).

Таким образом, измерив приращение тока после облучения детектора, зная постоянные параметры — площадь и толщину детектора, а также токовую константу  $\alpha_I$  для кремния, можно вычислить флюенс быстрых нейтронов из формулы (1):

$$\Phi = \Delta I / \alpha_I \cdot V. \quad (2)$$

Применение кремниевых детекторов в качестве мониторов флюенса быстрых нейтронов позволяет измерять значение эквивалентного по повреждениям кремния 1 МэВ флюенса для любого неизвестного спектра быстрых нейтронов. Обычно указывается нейтронный флюенс, эквивалентный 1 МэВ/Si [8]. Также надо заметить, что при представлении экспериментальных результатов зависимости параметров п/п материалов и детекторов от флюенса нейтронов шкала флюенса всегда указывается в эквивалентных 1 МэВ/Si значениях, это принято всеми исследовательскими группами в мире. Эквивалентная шкала флюенса 1 МэВ/Si позволяет корректно сравнивать ре-

#### Плотность потока, флюенс нейтронов и $\gamma$ -доза для образцов, расположенных на различном расстоянии от водяного замедлителя ИБР-2, по Ni и Si

Образец	Расстояние от замедлителя до конца двутавра, м	Расстояние от замедлителя до образца, м	Плотность потока по Ni, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Плотность потока по Si, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\gamma$ -доза, Мрад
№ 1	0,16	3,16	$1,8 \cdot 10^9$	—	—
№ 2	0,5	<b>3,5</b>	$1,1 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^9$	<b>5,40</b>
№ 3	0,5	<b>4,1</b>	$3,6 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^9$	<b>1,40</b>
№ 4	0,16	4,36	$4,4 \cdot 10^8$	—	—
№ 5	0,5	<b>4,7</b>	$3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	<b>0,67</b>
№ 6	0,5	<b>5,3</b>	$1,52 \cdot 10^8$	$4,4 \cdot 10^8$	<b>0,47</b>
№ 7	0,16	<b>5,56</b>	$1,35 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^8$	—
№ 8	0,5	<b>5,9</b>	$1,1 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^8$	<b>0,37</b>
№ 9	0,16	6,16	$5,2 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^7$	—
№ 10	0,5	<b>6,5</b>	$8,8 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^7$	<b>0,17</b>
№ 11	0,16	6,66	$5,1 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^6$	—
№ 12	0,5	<b>7,1</b>	$4,1 \cdot 10^6$	$8,2 \cdot 10^6$	<b>0,15</b>
№ 13	0,16	7,16	$2,3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	—
№ 14	0,5	<b>7,7</b>	$1,5 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	<b>0,10</b>
№ 15	0,16	7,96	$6,3 \cdot 10^5$	$4,3 \cdot 10^5$	—
№ 16	0,5	<b>8,3</b>	$6,8 \cdot 10^5$	$7,9 \cdot 10^5$	<b>0,10</b>



зультаты, полученные при облучении в различных центрах (на источниках с разными спектрами). Различие двух методов заключается в том, что для нейтронно-активационного анализа применяется пороговый по энергии спутник  $^{57}\text{Ni}$  ( $E_{\text{порог}} = 1,4 \text{ МэВ}$ ) и часть спектра нейтронов не учитывается. При измерении эквивалентного значения флюенса 1 МэВ по повреждениям кремния учитывается (дает вклад в повреждения) весь спектр нейтронов, начиная с энергии 180 эВ (минимальная величина энергии нейтрона, необходимая для смещения атома кремния из решетки). Поэтому значение эквивалентного флюенса, измеренного по кремнию, всегда должно быть больше, чем значение флюенса, измеренного НАА ( $^{57}\text{Ni}$ ).

Для измерения  $\gamma$ -дозы использовали  $\gamma$ -дозиметры (пленки-мониторы).

Результаты эксперимента приведены в таблице и на рис. 3, 4. При облучении образцов на расстоянии 160 мм от конца двугавра (3) до замедлителя время облучения на мощности реактора в 1,875 МВт составило 241 ч, а при облучении на расстоянии 0,5 м — 267 ч. Жирным шрифтом выделены те значения, при которых сравниваются полученные плотности потока для разных методов измерения. Прочерки в таблице означают отсутствие планарного детектора или  $\gamma$ -пленки на данном расстоянии.

На рис. 3 представлена зависимость плотности потока быстрых нейтронов от расстояния до водяного замедлителя, или, другими словами, от места расположения (координаты) в изогнутой трубе для всех 16 образцов. Результаты зависимости получены двумя методами: 1 — с использованием планарных Si-детекторов и 2 — с использованием Ni-спутников для 11 координат. Характер падения плотности нейтронного потока (флюенса) с увеличением

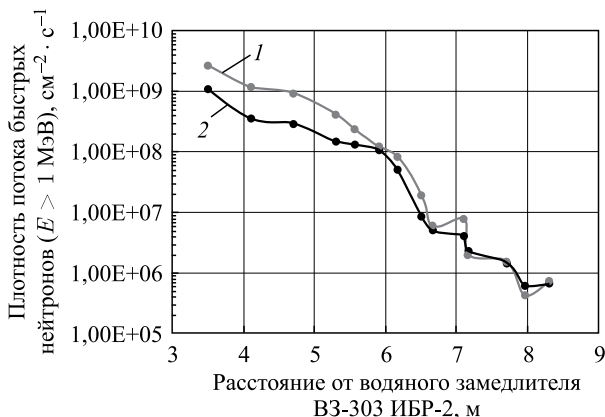


Рис. 3. Зависимость плотности потока быстрых нейтронов ( $E > 1 \text{ МэВ}$ ) от расстояния до водяного замедлителя ВЗ-303 ИБР-2. Измерения проведены: 1 — с использованием планарных Si-детекторов, 2 — методом нейтронно-активационного анализа на образце Ni



Рис. 4. Зависимость дозы  $\gamma$ -излучения от расстояния до водяного замедлителя ВЗ-303 ИБР-2

расстояния до замедлителя (активной зоны) в обоих случаях происходит экспоненциально. Такой характер распределения в данном случае может быть обусловлен кривизной трубы, неизвестным характером нейтронного рассеяния внутри трубы, а также погрешностью измерений, которая, предположительно, может находиться на уровне в 30%. Значения плотности потока, полученной при использовании планарных Si-детекторов, всегда больше по сравнению с результатами измерения при помощи Ni-спутников. Максимальное отличие результатов измерения плотности потока на Ni- и Si-«спутниках» для некоторых координат доходит до 3,6 раза.

Зависимость  $\gamma$ -дозы облучения, полученной образцами, от координаты представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что падение  $\gamma$ -дозы с увеличением расстояния также происходит экспоненциально.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы могут быть применены для определения плотности потока, флюенса быстрых нейтронов, а также дозы  $\gamma$ -излучения в экспериментах по изучению радиационной стойкости материалов при облучении до «малых» флюенсов от  $5 \cdot 10^{11}$  до  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Мониторинг быстрых нейтронов проводился двумя методами, различие полученных значений флюенса (> 1,4 МэВ) и эквивалентного флюенса 1 МэВ/Si в измерениях объяснимо и соответствует физическим принципам двух методов измерения. Данная методика нейтронного мониторинга позволяет облучать исследуемые образцы детекторов и материалов, помещаемые в изогнутую трубу установки для радиационных исследований, в диапазоне по флюенсу от  $10^{11}$  до  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ATLAS Collab., Lett. of Intent. Phase II Upgrade. CERN-2012-022, LHCC-1-023, December, 2012.
2. *Акимов Ю. К.* Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Дубна: ОИЯИ, 2009. 277 с.
3. *Bolshakova I. et al.* Experimental Evaluation of Stable Long Term Operation of Semiconductor Magnetic Sensors at ITER Relevant Environment // Nuclear Fusion. 2015. V. 55, No. 8. P. 083006–083016.
4. *Huran J. et al.* Radiation Hardness Investigation of PECVD Silicon Carbide Layers for PV Applications // Papers of Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 40th IEEE, Denver, 2014. P. 1815–1820.
5. *Verkhogliadov A. et al.* Irradiation Facility at the IBR-2 Reactor for Investigation of Material Radiation Hardness // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2015. V. 343. P. 26–29.
6. *Shabalin E. et al.* Spectrum and Density of Neutron Flux in the Irradiation Beam Line №3 of the IBR-2 Reactor // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 2. P. 336–343.
7. *Фронтасьева М. В.* Нейтронный активационный анализ на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ: Учебно-методическое пособие Учебно-научного центра ОИЯИ. УНЦ-2009-38. Дубна, 2009. 40 с.
8. *Замятин Н. И., Черемухин А. Е., Шафроновская А. И.* Способ измерения флюенса быстрых нейтронов с помощью полупроводникового детектора. А.С. RU2553840, 2015.
9. *Замятин Н. И., Черемухин А. Е., Шафроновская А. И.* Способ измерения флюенса быстрых нейтронов с помощью планарных кремниевых детекторов // Письма в ЭЧАЯ. 2017 (принято в печать).

Получено 20 июля 2017 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 06.09.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,89. Тираж 210 экз. Заказ № 59226.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)