

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЛЮЕНС МОНИТОРОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИЯХ В ОБЛУЧАТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ РЕАКТОРА ВВР-К

Н.К. Романова<sup>1)</sup>, N. Takemoto<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт ядерной физики Республика Казахстан (ИЯФ РК),  
050032, г. Алматы, ул. Ибрагимова, д.1, e-mail: Romanova@inp.kz

<sup>2)</sup>Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center Japan  
Atomic Energy Agency (JAEA), Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibarakiken,  
e-mail: Takemoto.Noriyuki@jaea.go.jp

В целях исследования возможности проведения трансмутационного легирования монокристаллического кремния на реакторе ВВР-К ИЯФ РК между JAEA Японии и ИЯФ РК было достигнуто соглашение по проведению облучения кремниевых кристаллов диаметром 6 дюйм в облучательном канале К-23. Было запланировано проведение предварительных облучательных тестов для определения плотностей потока нейтронов в выбранном канале реактора ВВР-К. В тестах алюминиевое устройство с флюенс мониторами имеет такие же размеры, как и кремниевый кристалл. Флюенс мониторы использовались для исследования поля нейтронов и определения плотности потока как тепловых, так и быстрых нейтронов.

В этом докладе представлены результаты измерений плотности потока и флюенса нейтронов с использованием флюенс мониторов в местах облучения кремниевых кристаллов в канале реактора ВВР-К.

## Введение

На базе реактора проводятся внутриреакторные испытания ТВС с топливом пониженного обогащения (19,7% по изотопу урана-235). Абсолютные измерения характеристик поля нейтронов в облучательных каналах активной зоны реактора при испытаниях проводились стандартными нейтронно-активационными детекторами: в тепловой области с использованием детекторов из золота без экранов (активация за счет реакции  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ ) и в экранах из кадмия; в быстрой области - на детекторах из индия, в этом случае активация детекторов осуществляется за счет ядерной реакции  $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$ . Пространственно-энергетические распределения нейтронов проводились с использованием детекторов из диспрозия. Для регистрации использовалась реакция (n,γ) на изотопе  $^{164}\text{Dy}$  [1].

Для изучения флюенса нейтронов, накопленного в результате облучения на ВВР-К (тепловая мощность 6 МВт) в выбранном канале реактора, была обоснована возможность применения метода облучения флюенс мониторов. Например, ранее такие исследования проводились на JMTR (50 МВт) JAEA в Японии [5]; на реакторе HANARO (30 МВт) KAERI в Корее, где использовались Fe-Ni-Ti нейтронные флюенс мониторы для определения флюенса быстрых нейтронов [3]; Au, Co, Ni, Ti, Fe мониторы использовались на реакторе ВВР-СМ (10 МВт) Института Ядерной физики Республики Узбекистан [3].

Согласно программе «Отработка технологии радиационного легирования кремния» (STC №II-4 Irradiation Technology for NTD-Si) [4], выполняемой в рамках кооперации (STC №II-4) между ИЯФ РК и JAEA, в Японии было изготовлено, доставлено в ИЯФ и установлено на облучательном канале К-23 реактора ВВР-К специальное поворотное устройство.

## Структура флюенс мониторов и их расположение в алюминиевых устройствах

Для флюенс мониторов применимы реакции на железе  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$  в естественной смеси и кобальте  $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$  в сплаве алюминий-кобальт с содержанием кобальта (0.11% удельн. вес  $^{59}\text{Co}$ ), которые использовались для определения флюенса быстрых и тепловых нейтронов соответственно. Флюенс мониторы представлены в виде контейнеров из алюминия, запаянных с двух сторон. В JAEA на базе JMTR были изготовлены и поставлены в ИЯФ 60 флюенс мониторов (№ 1-60) для проведения предварительных облучательных тестов в облучательном канале ВВР-К. Флюенс мониторы были двух типов: I тип - с №1 по №30 (в составе их были 5 проволочек из железа и пластинка с алюминий-кобальтом); и II тип - с №31 по №60 (между ними находилась алюминиевая пластинка). Структура флюенс мониторов представлена на рис.1 -2.

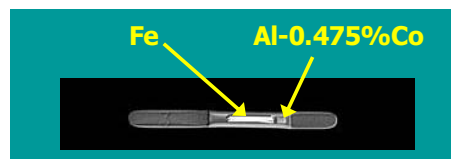


Рис. 1. Флюенс мониторы I типа (с №1 по №30)

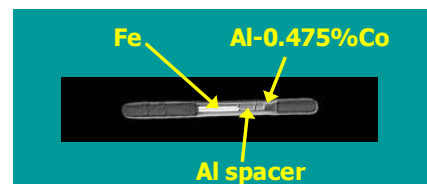


Рис. 2. Флюенс мониторы II типа (с №31 по №60)

Флюенс мониторы устанавливались в алюминиевые устройства для проведения облучений. Четыре таких алюминиевых устройства со встроенными в них флюенс мониторами были изготовлены в Японии и доставлены в ИЯФ на реактор ВВР-К. Два устройства имели размеры Ø151,13 мм и длиной 202 мм (с маркировками L202-1 и L202-2.); два других же таких алюминиевых устройства были Ø151,3 мм и длиной 278 мм (L278-1 и L278-2), соответственно.

Алюминиевые устройства были изготовлены из марки алюминия А1070. В каждом из них были сделаны пять сквозных отверстий диаметром 3 мм по всей длине устройства. Четыре отверстия, располагались по окружности Ø130 мм, и одно находилось в центре алюминиевого устройства. По высоте устройства они имели три позиции, и в каждой позиции по пять флюенс мониторов для определения радиального распределения флюенса нейтронов. Флюенс мониторы были установлены в сквозные отверстия и закреплены болтами сверху и снизу. Такое расположение флюенс мониторов внутри устройства позволило определить пространственное распределение флюенса нейтронов по высоте для 202 - 278 мм и по диаметру канала.

### Условия облучений

Во время облучений активная зона реактора состояла из штатных ТВС типа ВВР-Ц; бериллиевого вытеснителя с тремя опытными ТВС с топливом пониженного обогащения типа ВВР-КН и бериллиевого отражателя, сформированного на периферии активной зоны из блоков бериллия. «Мокрый», вертикальный канал К-23 (диаметр 193 мм, высота канала 4550 мм), выбранный для проведения облучений находится за баком активной зоны. Алюминиевые устройства загружались в облучательный канал и были облучены при постоянной тепловой мощности реактора равной 6 МВт для 2 и 4 часов облучения соответственно. Радиальная равномерность накопления флюенса обеспечивалась за счёт вращения устройств в канале с постоянной скоростью вращения в течении всего времени облучения.

Для определения аксиального распределения флюенса нейтронов центры устройств были помещены в трёх местах относительно центра активной зоны реактора. Для первого и второго алюминиевых устройств (№L202-1, №L202-2) центры были размещены на 70 мм ниже центра активной зоны, в двух других случаях (№L278-1, №L278-2) на 30 и 13 мм, выше центра активной зоны.

### Методика определения накопления флюенса нейтронов с помощью флюенс мониторов

Предполагалось определить активность образцов из полосок проволочек, помещённых в флюенс мониторы. Флюенс мониторы после облучения и отстоя вскрывались для измерения активности проволочек из железа и алюминий-

кобальтовой пластинки. Для быстрых нейтронов ( $E > 1,0 \text{ MeV}$ ) учитывалась реакция на железе:  $^{54}\text{Fe}(n,p) \rightarrow ^{54}\text{Mn}$   $T_{1/2} = 312,12$  дней. Для тепловых нейтронов ( $E < 0,683 \text{ eV}$ ) реакция на кобальте:  $^{59}\text{Co}(n,\gamma) \rightarrow ^{60}\text{Co}$   $T_{1/2} = 5,271$  лет.

Активность исследуемых образцов измерялась на германиевом детекторе. Гамма-спектры, полученные после облучения и отстоя для проволочек из железа на реакции  $^{54}\text{Fe}(n,p) \rightarrow ^{54}\text{Mn}$  с энергией пика 835 кэВ приведена на рис. 3 и алюминий-кобальт пластинки на реакции  $^{59}\text{Co}(n,\gamma) \rightarrow ^{60}\text{Co}$  с энергиями пиков 1173 кэВ и 1333 кэВ представлены на рис. 4.

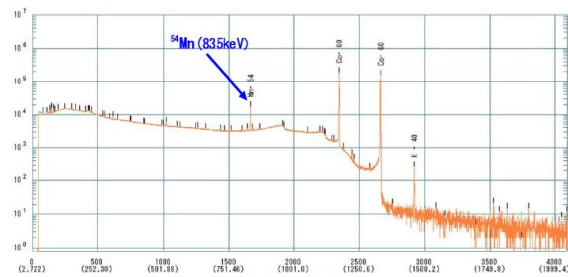


Рис. 3. Спектрограмма для проволочек из железа

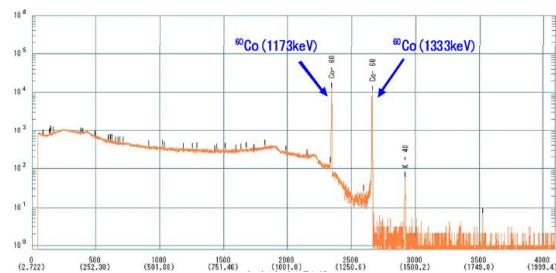


Рис. 4. Спектрограмма для пластинки из алюминий – кобальт

Расчёт флюенса нейтронов через активность, накопленную в результате облучения и отстоя, был проведён следующим образом:

$$\Phi = A \cdot \frac{G}{NMF} \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\sum_{j=1}^n t_{ij}}{\sum (1 - e^{-\lambda t_{ij}}) e^{-\lambda t_{oj}}}; \quad (1)$$

$\Phi$  - флюенс нейтронов ( $\text{см}^{-2}$ );  $A$  - активность (Бк);  $G$  - атомный вес ( $\text{Fe} = 55,9$  а.е.м.,  $\text{Co} = 58,9$  а.е.м.);  $N$  - число Авагадро ( $6,023 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ );  $M$  - вес исследуемого образца (г);  $F$  - содержание ( $^{54}\text{Fe}$  и  $^{59}\text{Co}$ ) в исследуемом образце (Fe or Al-Co);  $\sigma$  - эффективное сечение реакции (барн);  $t_{ij}$  -  $j$ -th время облучения (с);  $\lambda$  - постоянная распада ( $\text{с}^{-1}$ );  $t_{oj}$  - время выдержки после облучения  $j$ -th и отстоя (с);  $n$  - операционный цикл.

Оценка величины среднего сечения для кобальта и железа, необходимая для определения флюенса нейтронов, была произведена в 3-х мерной геометрии расчётным кодом MCU-REA методом Монте-Карло [2]. Для

быстрой области энергий считался интервал от 1 МэВ до 106 МэВ, и для тепловой области спектра – от 0 до 0,683 эВ.

Усредняя по энергетическому спектру распределения плотности потока нейтронов в выбранных интервалах энергий, среднее значение сечения получено для быстрых нейтронов:

$$\bar{\sigma}_{1,0} = \frac{\int_0^{\infty} \phi(E)\sigma(E)dE}{\int_{1,0}^{\infty} \phi(E)dE}; \quad (2)$$

и для тепловых нейтронов:

$$\bar{\sigma}_{0,683} = \frac{\int_0^{\infty} \phi(E)\sigma(E)dE}{\int_0^{0,683} \phi(E)dE}; \quad (3)$$

$\sigma(E)$  - эффективное сечение реакции (барн);

$\phi(E)$  - скорость реакции (нейтрон\*см<sup>-2</sup>\*сек<sup>-1</sup>).

Значение флюенса позволило получить абсолютное значение плотности потока нейтронов, приведённое на 6 МВт реактора.

Определены значения плотности потока тепловых нейтронов в облучательном канале реактора ВВР-К при проведении четырёх тестовых облучений алюминиевых устройств с флюенс мониторами для трёх позиций центра устройств относительно центра активной зоны, так для № L202-1 – 2,3×10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>\*с<sup>-1</sup> и № L202-2 – 2,7×10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>\*с<sup>-1</sup> (70 мм ниже центра активной зоны); № L278-1 – 2,6×10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>\*с<sup>-1</sup> (30 мм выше центра активной зоны); № L278-2 – 2,8 ×10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>\*с<sup>-1</sup> (13 мм выше центра активной зоны).

### Заключение

Во время проведения испытаний ТВС с топливом пониженного обогащения на реакторе ВВР-К было проведено экспериментальное определение характеристик поля нейтронов методом определения накопленного флюенса нейтронов, путём облучения флюенс мониторов и выдержки после их облучения. Значения

плотностей потока определённых ранее активационными детекторами хорошо согласуется с данными, полученными методом облучения флюенс мониторов. Так, для энергии нейтронов  $E < 0,465$  эВ в центре канала предполагаемое значение флюенса нейтронов для 2 часов облучения должно быть  $2,0 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и для 4 часов облучения  $4,0 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> соответственно. Средние значения флюенса для тепловых нейтронов с энергией  $E < 0,683$  эВ, полученные экспериментально с использованием флюенс мониторов равны:

№ L202-1 –  $1,8 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> -2 часа облучений;

№ L202-2 –  $3,9 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> -4 часа облучений;

№ L278-1 –  $1,9 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> -2 часа облучений;

№ L278-2 –  $4,0 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> - 4 часа облучений.

Полученные данные подтверждают возможность проведения трансмутационного легирования монокристаллического кремния (Ø151 мм) на реакторе ВВР-К ИЯФ РК в облучательном канале с плотностью потока тепловых нейтронов ( $E < 0,683$  эВ)  $2,8 \cdot 10^{12}$  нейтрон\*с<sup>-1</sup>\*см<sup>-2</sup> для накопления флюенса тепловых нейтронов  $4,0 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> в течении 4 часов облучений.

### Список литературы

1. Аринкин Ф.М. и др. Определение характеристик поля нейтронов в облучательных каналах ВВР-К при испытаниях опытных ТВС с топливом пониженного обогащения. // Материалы 8-й Междунар. конф. "Ядерная и радиационная физика". - Алматы, 2011. - С.82.
2. Программа MCU-REA с библиотекой констант DLC/MCU.DAT-2.1. // Вопросы атомной науки и техники. Серия Физика ядерных реакторов. - М.: - 2001. - Вып. 3. - С.55-62.
3. Research reactor application for materials under high neutron fluency. // Proceedings of an IAEA Technical Meeting (TM-34779). IAEA-TECDOC-1659. - VIENNA, 2011. - P.45-155.
4. Kawamura H., et al. Status of International Cooperation in Nuclear Technology on Testing/Research Reactors between JAEA and INP-NNC. – JAEA – Review. – 2011. – P. 042 (2011).

## INVESTIGATION OF NEUTRON FLUENCE USING FLUENCE MONITORS FOR IRRADIATION TEST AT WWR-K

N. K. Romanova<sup>1</sup>, N. Takemoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INP RK, Almaty, Ibragimova str. 1, e-mail: romanova@inp.kz

<sup>2</sup>JAEA Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken, e-mail: takemoto.noriyuki@jaea.go.jp

Irradiation test of a Si ingot is planned using WWR-K in Institute of Nuclear Physics Republic of Kazakhstan (INP RK) to develop an irradiation technology for Si semiconductor production by Neutron Transmutation Doping (NTD) method in the framework of an international cooperation between INP RK and Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Japan. It is possible to irradiate the Si ingot of 6 inch in diameter at the K-23 irradiation channel in the WWR-K. The preliminary irradiation test using 4 Al ingots was performed to evaluate the actual neutronic irradiation field at the K-23 channel in the WWR-K. Each Al ingot has the same dimension as the Si ingot, and 15 fluence monitors are equipped in it. Iron wire and aluminum-cobalt wire are inserted into them, and it is possible to evaluate both fast and thermal neutron fluxes by measurement of these radiation activities after irradiation.

This report described the results of the preliminary irradiation test and the neutronic calculations by Monte Carlo method in order to evaluate the neutronic irradiation field in the irradiation position for the silicon ingot at the channel in the WWR-K.