

К. Турлыбекулы , М.Т. Айткулов* , Ж.Т. Бугыбай ,
С.К. Аскербеков , А.А. Шаймерденов 
Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан
*e-mail: maitkulov@inp.kz

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ПОРОШКА ФТОРИРОВАННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ В РЕАКТОРЕ ВВР-К: УСЛОВИЯ И ПЕРВИЧНАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ОБРАЗЦОВ

Легированные фтором порошки детонационных наноалмазов (ДНА) рассматриваются в качестве нового класса отражателей нейтронов и могут существенно улучшить характеристики источников очень холодных и ультрахолодных нейтронов, что в свою очередь приведет к проведению новых видов экспериментов на качественном уровне. Эти улучшения достигаются за счет таких свойств ДНА как высокое диффузионное и квазизеркальное отражение. Благодаря высокой отражающей способности улучшается эффективность доставки нейтронов и, следовательно, потоки нейтронов на нейтронных установках. Исходя из этого, фторированные ДНА рассматриваются как потенциальный материал отражателя нейтронов для проектируемого источника очень холодных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-К. Однако, на сегодняшний день экспериментальных данных о поведении, фторированных ДНА в нейтронном поле недостаточно и поэтому с целью изучения радиационной стойкости ДНА на реакторе ВВР-К начаты работы по их облучению и дальнейшему исследованию. Для этого была разработана оптимальная конструкция облучательной капсулы и проведены комплексные расчеты по обоснованию условий и пределов реакторного облучения. В настоящей работе приводятся описание облученных образцов и реакторного эксперимента, методология и условия облучения образцов, и результаты их первичной характеристики после облучения.

Ключевые слова: детонационный наноалмаз, фтор, ВВР-К, очень холодные нейтроны, ультрахолодные нейтроны.

K. Turlybekuly, M.T. Aitkulov*, Zh.T. Buggybay, S.K. Askerbekov, A.A. Shaimerdenov
Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: maitkulov@inp.kz

Experiment on low-temperature irradiation of fluorinated detonation nanodiamond powder in the WWR-K reactor: conditions and initial characterisation of samples

Fluorine-doped detonation nanodiamond (DND) powders are considered as a new class of neutron reflectors and can significantly improve the performance of very cold and ultracold neutron sources, which in turn will lead to new types of experiments at a qualitative level. These improvements are achieved due to such properties of DND as high diffusion and quasi-mirror reflection. The high reflectivity improves the neutron delivery efficiency and, consequently, the neutron fluxes at neutron facilities. On this basis, fluorinated DNDs are considered as a potential neutron reflector material for the designed very cold and ultracold neutron source at the WWR-K reactor. However, to date, experimental data on the behaviour of fluorinated DND in the neutron field are insufficient, and therefore, in order to study the radiation resistance of DND at the WWR-K reactor, work has been started on their irradiation and further study. For this purpose, an optimal irradiation capsule design was developed and comprehensive calculations were performed to justify the conditions and limits of reactor irradiation. This paper describes the irradiated samples and reactor experiment, the methodology and conditions for irradiating the samples, and the results of their initial characterisation after irradiation.

Keywords: detonation nanodiamond, fluorine, WWR-K, very cold neutrons, ultracold neutrons.

Қ. Тұрлыбекулы, М.Т. Айтқулов*, Ж.Т. Буғыбай, С.Қ. Әскербеков, А.А. Шаймерденов

Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: maitkulov@inp.kz

ССР-Қ реакторында фторланған детонациялық наноалмаздардың ұнтағын төмен температуралық сәулелендіру эксперименті: шарттары және үлгілерді бастапқы сипаттау

Фтормен легирленген детонациялық наноалмаздардың (ДНА) ұнтақтары нейтрондарды шағылыстыратын жаңа материалдар ретінде қарастырылып отыр. Олар суық және ультрасуық нейтрон көздерінің сипаттамаларын едәуір жақсартуының арқасында жаңа эксперимент түрлерінің сапалы деңгейде өтуіне септігін тигізеді. Ондай нәтижеге ДНА-ның жоғары диффузиялық және квазиайналы шағылыстыру сияқты қасиеттері есебінен қол жеткізіледі. Шағылыстыру қабілетінің жоғары болу есебінен нейтрондарды жеткізу және сәйкесінше нейтрон қондырғыларындағы нейтрондар ағыны жақсара түседі. ССР-Қ реакторында салынуға жоспарланған өте суық және ультрасуық нейтрондар көзінің шағылыстырғыш материалы ретінде фторланған ДНА қарастырылуда. Дегенмен, қазіргі таңда нейтрон өрісіндегі фторланған ДНА-ның қалай өзгертіндігі туралы эксперименттік деректер тым аз, сондықтан ДНА-ның радиациялық төзімділігін зерттеу үшін ССР-Қ реакторында оларды сәулелендіру және одан кейінгі зерттеулер бойынша жұмыстар басталды. Ол үшін сәулелендіру капсуласының оңтайлы конструкциясы әзірленді және реакторлық сәулелендірудің шарттары мен шектерін негіздеу үшін оған кешенді есептер жүргізілді. Осы жұмыста сәулеленген үлгілердің және реакторлық эксперименттің сипаттамасы, үлгілерді сәулелендіру әдісі мен шарттары және сәулелендіруден кейінгі бастапқы сипаттау нәтижелері келтірілген.

Түйін сөздер: детонациялық наноалмаз, фтор, ССР-Қ, өте суық нейтрондар, ультрасуық нейтрондар.

Введение

Наноалмазы (NDs) [1-4] считаются перспективным материалом для ряда приложений в трибологии, модификации свойств материалов, доставке лекарств, косметологии, биоимиджинге, хранении энергии, катализе, квантовой инженерии и т.д. (см., например, обзоры [5,6] и ссылки в них).

Одним из направления применения наноалмазов является нейтронная наука и технология. Наноалмаз считается перспективным материалом для создания отражателей очень холодных нейтронов (ОХН) и ультрахолодных нейтронов (УХН). Нейтронные отражатели [6-8] имеют огромное значение. Их основное назначение - перенаправлять потоки нейтронов в нужное место и тем самым снижать потери нейтронов. Они повышают производительность источников нейтронов и транспортных систем экономичным и эффективным образом.

В настоящее время доступно множество различных методов получения наноалмазов для различных направлений исследования. Их можно получить путем детонационного синтеза, лазерного синтеза, химического осаждения из паровой фазы и т.д. Синтез путем детонационного взрыва является одним из первых и эффективных методов получения наноалмазов. Наноалмазы полученные таким

методом называются детонационными (ДНА). Синтез наноалмазов путем детонационного взрыва происходит при высоких давлениях (20 ± 30 ГПа), и температурах (3000 ± 4300 К) в области существования стабильной алмазной фазы [1,2]. Считается, что каждая частица детонационного наноалмаза ДНА представляет собой частицу, состоящую из алмазного ядра в форме многогранника, окруженного некристаллической С-оболочкой, содержащей функциональные группы [3-5]. Отражение нейтронов от порошка ДНА возникает в результате многократного когерентного упругого рассеяния. Следовательно, рассеяние и перенос нейтронов в порошках детонационного наноалмаза определяется свойствами, характеристиками, химическим составом, геометрическим размером и формой детонационных наноалмазов.

Модифицирование и легирование ДНА приводит к существенному изменению свойств ДНА. Так, например, в целях обеспечения увеличения эффективности отражательной способности нейтронов с высоким альбедо была применена к ДНА технология фторирования, тем самым получая фторированного ДНА – F-DND. Также такие свойства ДНА как высокое диффузионное и квазизеркальное отражение позволит кардинально улучшить характеристики источников нейтронов, эффективность доставки

нейтронов и, следовательно, потоки медленных нейтронов на нейтронных установках. Это также может позволить разработать новое поколение нейтронных источников и проведение новых видов экспериментов.

Исходя из этого, ДНА рассматриваются как потенциальный материал отражателя нейтронов для проектируемого источника очень холодных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-К [9-11]. С целью изучения радиационной стойкости ДНА и влияния нейтронного облучения на отражающие свойства ДНА на реакторе ВВР-К начаты работы по данному направлению. В настоящей статье приводятся описание реакторного эксперимента, условия облучения образцов и результаты их первичной характеристики.

Материалы и методы

Объектами исследования являются образцы детонационных наноалмазов, приготовленных стандартным взрывным методом (Таблица 1).

Условия эксплуатации ДНА в качестве отражателя нейтронов в источниках холодных нейтронов (ХН) и очень холодных нейтронов (ОХН) характеризуются низкой температурой (не более 100°C) и сравнительно не большим

флюенсом быстрых нейтронов (10^{19} - 10^{20} см⁻²). Учитывая эти факторы, была разработана конструкция облучательной капсулы, формирующая заданные условия облучения ДНА в нейтронном поле реактора ВВР-К (Рисунок 1).

Таблица 1 – Описание исследуемых образцов

№	Образец	Масса, г	Насыпная плотность, г/см ³	Примечание
1	F-DND	0,35	0,381	фторированный порошок
2	FDNDII	0,23	0,371	дважды фторированный порошок

Основой облучательной капсулы является стандартная ампула реактора ВВР-К, в которую устанавливаются три под-капсулы из алюминиевого сплава. Во внутрь каждой под-капсулы устанавливается ампула из кварца, которая заполнена ДНА. Капсула и под-капсулы снаружи охлаждаются водой первого контура реактора ВВР-К. При этом, под-капсулы и кварцевые ампулы заполнены инертным газом.

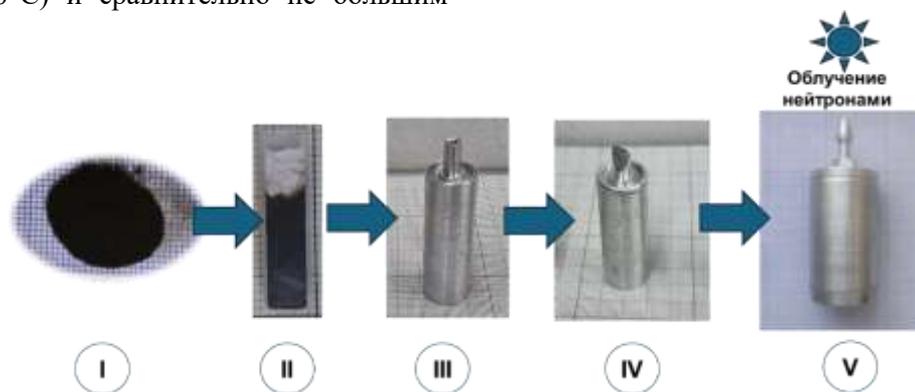


Рисунок 1 – Схематический вид облучательного эксперимента: I – исходный образец; II – образец в кварцевой ампуле; III – ампула в алюминиевой капсуле; IV – капсула заполняется аргоном и герметизируется; V – капсула в алюминиевой ампуле

Расчетное исследование нейтронно-физических характеристик разработанной конструкции облучательной капсулы проводилось методом Монте-Карло с помощью транспортного кода MCNP6 [12]. Транспортный код MCNP6 предназначен для решения задач в области физики ядерных реакторов, радиационной защиты, дозиметрии, радиографии, радиационной медицины и ядерной безопасности. Пользователь имеет возможность моделировать геометрические

трехмерные конфигурации, задавая математические уравнения ограничивающих их поверхностей первой, второй и четвертой степени, и их заполнение произвольным материалом, задавая концентрации ядер элементов, входящих в состав вещества. При моделировании в транспортном коде MCNP6 использовалась библиотека сечений взаимодействия нейтронов с веществом ENDF/B-VII.1 [13]. В MCNP6 была смоделирована текущая конфигурация активной зоны реактора

ВВР-К с реальным материальным составом. Статистическая погрешность расчетов не превышала 5%. В качестве облучательной позиции в активной зоне реактора ВВР-К был выбран периферийный вертикальный канал в ячейке 10-2.

Теплофизические расчеты проведены комплексом COMSOL Multiphysics [14], предназначенным для моделирования комплексных физических задач. Для расчета применялась трехмерная геометрия, физически реально, отображающая строение и размеры капсулы с порошком ДНА, а также окружающую её часть облучательного канала (области воды сверху и снизу капсулы, стенку облучательного канала из алюминиевого сплава). Для описания теплофизических свойств материалов использовалась стандартная библиотека материалов COMSOL. Это означает, что все необходимые для теплового расчета параметры (теплопроводность k , теплоемкость при постоянном давлении C_p и плотность ρ) и их температурные зависимости взяты из апробированного источника.

Исходными условиями для задачи считалось температура всех материалов модели равная 40°C. Давление воды равно атмосферному с учетом гидростатической добавки на высоту водяного столба, абсолютное давление аргона в капсулах считается равным 100 кПа. Тепловые контакты идеальны и не нарушаются в ходе нагрева. Фазовые изменения свойств воды других материалов в ходе нагрева не учитываются.

Поскольку нецелесообразно включать в модель весь объем воды в канале (примерно 2 метра водяного столба над капсулой и 1 метр - под ним), то на верхней и нижней границах водяного домена указаны граничные условия конвекционного теплообмена с основной массой воды канала по закону

$$Q_0 = h \cdot (T_{ext} - T), \quad (1)$$

где Q_0 – удельный поток конвективного тепла на единицу площади; T – температура воды в окрестности пенала (расчетное значение), T_{ext} – внешняя температура воды в системе охлаждения реактора; $h = 0.3$ Вт/(см²*К) – коэффициент конвекции для нагретой воды.

В настройках модели было присвоено тепловыделение конструкционным материалам и порошку ДНА, выделяющим тепло под воздействием нейтронного и фотонного излучений. В модели учитывается

излучательный теплообмен между капсулой и стенкой канала (через воду) по закону Стефана Больцмана. Эмиссионные свойства поверхностей равны $\varepsilon = 0.3$.

Для описания ламинарных потоков воды и аргона при их свободной конвекции вода задается в модели как слабосжимаемая жидкость, а аргон как несжимаемый газ. Все поверхности, омываемые водой и аргоном, указаны как поверхности трения при всех скоростях течения. На воду действует направленная вниз сила тяжести, обеспечивающая, при наличии перепада температур, условие возникновения тепловой конвекции воды.

Рентгенофазовый анализ образцов выполнялся на универсальном комплексе D8 ADVANCE (Bruker, Германия), схема съемки « θ - θ » по Брэггу-Брентано, трубка с медным анодом (длина волны 1,5406 Å), рабочие параметры на трубке 40 кВ, 40 мА, NaI сцинтилляционный детектор, диапазон углов по 2θ 20-120°, шаг 0,02 градуса, скорость сканирования 0,5 сек/шаг. Съемка производилась с вращением держателя с образцом на угловой скорости 60 об/мин с помощью управляющей программы Adjust. Качественный фазовый анализ выполнен в программе EVA. Для идентификации фаз использована база данных ICDD: International Centre of Diffraction Data (порошковая база данных PDF2).

Взвешивание образцов проводилось на аттестованных аналитических весах марки «Vibra HT 224RCE» с погрешностью $\pm 0,0002$ г.

Измерение мощности дозы фотонного излучения проводилось с помощью дозиметра FH 40G-L10 с диапазоном измерения от 10 нЗв/час до 100 мЗв/час. Предел основной относительной погрешности измерения мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ составляет – 20%.

Наведенная активность гамма-излучения от облученных образцов измерялась с помощью широкодиапазонного (от 3 кэВ до 3 МэВ) германиевого гамма-спектрометра Canberra GX 2518, с относительной эффективностью 25%. Перед началом работ гамма-спектрометр был откалиброван набором образцовых источников ОСГИ.

Результаты и обсуждения

Расчетным путем определен энергетический спектр нейтронов в зоне облучения ДНА (Рисунок 2).

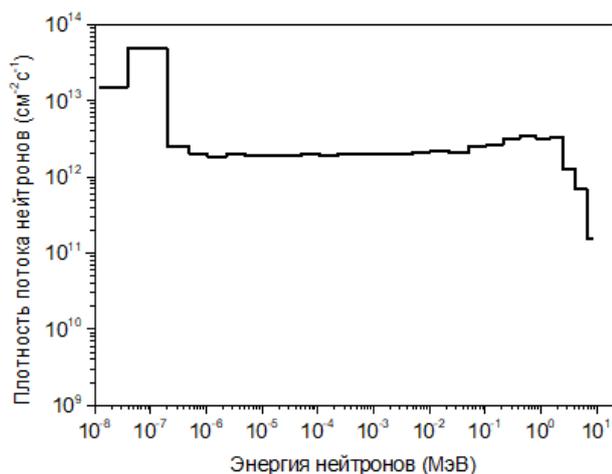


Рисунок 2 – Энергетический спектр нейтронов в облучательной позиции

По результатам нейтронно-физических расчетов энерговыделение в ДНА составило 2.4 Вт/г (таблица 2). Энергетическое распределение нейтронов в объеме образцов приведено в таблице 3. Рассмотрены три энергетические группы нейтронов. Доля тепловых нейтронов (<0.683 эВ) составила 56%, а доля быстрых нейтронов (>1 МэВ) – 6%. Интегральная плотность потока нейтронов – $1.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Эффект реактивности от загрузки капсулы с образцами в активную зону реактора ВВР-К составил минус 0.1 % $\Delta k/k$.

Распределение температуры по объему облучательной капсулы показано на рисунке 3. Из рисунка 3 видно, что в местах протока теплоносителя в капсуле создается турбулентное

движение жидкости, что приводит к повышению температуры до 70°C. Температура образцов (порошка ДНА) не повысится выше 81°C, что является приемлемым и соответствует задаче эксперимента. Стационарное распределение температуры по объему капсулы установится через 12 минут после начала облучения в нейтронном поле реактора ВВР-К. Максимальная скорость движения воды не превысит 1 см/сек, средняя скорость воды в зазоре канал-капсула составит 3 мм/сек.

Таблица 2 – Энерговыделение в образцах и конструкционных материалах облучательной капсулы

Материал	Удельное энерговыделение, Вт/г
Алюминиевый сплав (обл. капсула)	0.68
Алюминиевый сплав (под-капсула)	0.69
Порошок ДНА	2.43

Таблица 3 – Энергетическое распределение нейтронов

Энергия нейтронов	Плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
0 – 0.683 эВ	6.07E+13
0.683 эВ - 1 МэВ	4.17E+13
> 1 МэВ	6.33E+12

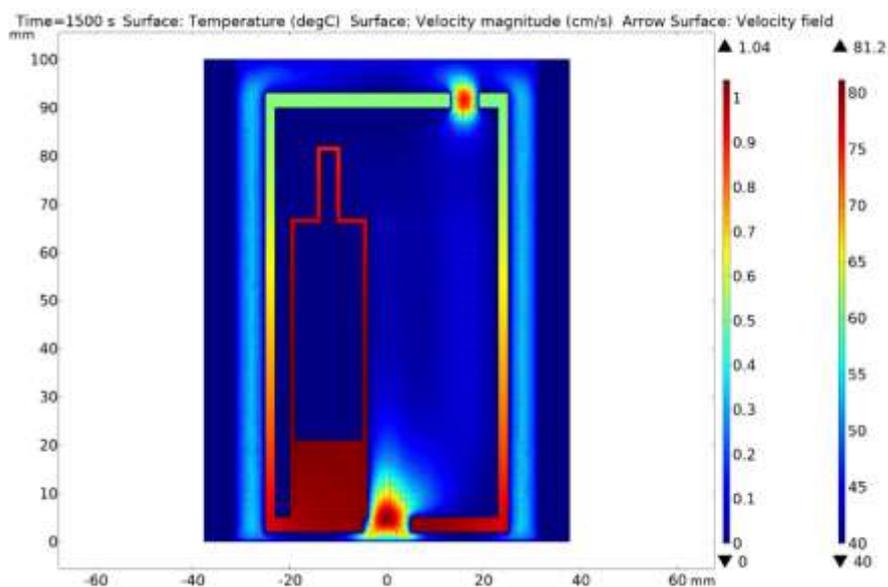


Рисунок 3 – Распределение температуры по вертикальной плоскости облучательной капсулы

Проведен рентгенофазовый анализ двух необлученных образцов наноалмазов F-DND и FDNDII. На рисунке 4 представлены дифрактограммы порошка наноалмаза F-DND и FDNDII. Три рефлекса на дифрактограмме образца F-DND соответствуют положению линий штрих-диаграммы карточки алмаза (№ 06-0675), имеющего ГЦК-решетку. В программе EVA для автоматического установления положения пиков применена функция

PeakSearch. Параметр кристаллической решетки рассчитан в программе RTP: $a = (3,5834 \pm 0,0017) \text{ \AA}$. Согласно карточке № 06-0675 параметр решетки алмаза составляет $a = 3,566 \text{ \AA}$. Расхождение рассчитанного и карточного значений $0,017 \text{ \AA}$. Параметр кристаллической решетки для образца FDNDII составил $a = (3,5729 \pm 0,0040) \text{ \AA}$. Расхождение рассчитанного и карточного значений $0,007 \text{ \AA}$.

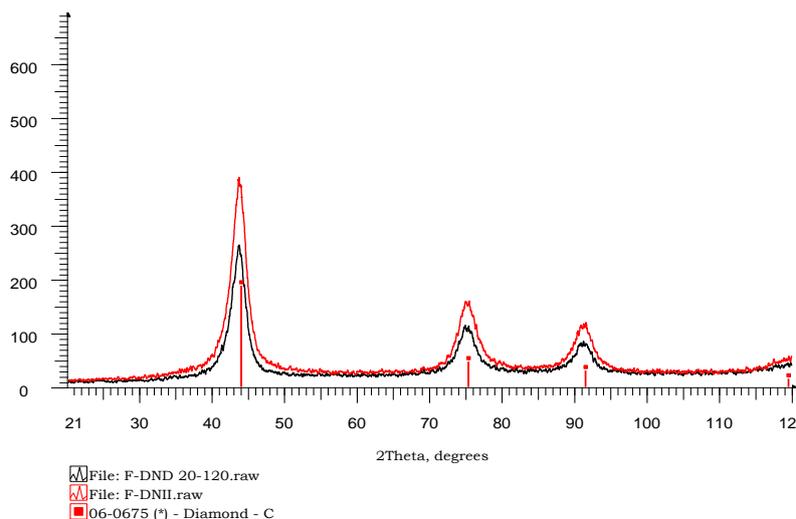


Рисунок 4 – Дифрактограммы образцов F-DND и FDNDII

В «горячей» камере образцы были извлечены из капсул после облучения и проведена первичная характеристика образцов (внешний вид, масса, радионуклидный состав и мощность эквивалентной дозы гамма-излучения). Внешний вид облученных образцов приведены на рисунке 5. Радионуклидный состав образцов приведен в таблице 4. Мощность дозы гамма-излучения от образца F-DND составило 1.65 мкЗв/ч , от FDNDII – 0.87 мкЗв/ч . Масса образца F-DND составила 0.35 г , FDNDII – 0.23 г .

Таблица 4 – Радионуклидный состав образцов

№	Нуклид	T _{1/2} , сут	Активность, Бк/образец	
			F-DND	FDNDII
1	Sc-46	1925	1601±119	149±26
2	Cr-51	84	470444±36690	6778±683
3	Mn-54	312	1135±90	-
4	Fe-59	28	2543±169	-
5	Co-58	44	2227±145	946±74
6	Co-60	244	8438±380	2512±250
7	Zn-65	60	29939±1244	7456±344
9	Sb-124	71	14691±323	18850±787
11	Eu-152	250	-	869±125



а)



б)

Рисунок 5 – Внешний вид ДНА после облучения: (а) F-DND, (б) FDNDII

Из таблицы 4 видно, что основной вклад в радиоактивность ДНА вносят изотопы сурьмы, цинка и хрома. При этом следует отметить, что радиоактивность образцов по каждому из радионуклидов меньше минимальной значимой активности [15] поэтому образцы не подлежат учету и контролю.

Выводы

Разработана методология эксперимента порошков ДНА в активной зоне реактора ВВР-К. Выбрана оптимальная конструкция облучательной капсулы и проведены комплексные расчеты по обоснованию условий и пределов реакторного облучения. Установлено, что в зоне облучения преимущественно тепловой спектр нейтронов с интегральной плотностью потока нейтронов $1.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Температура облучения образцов не превысило 80 °С. Среда облучения – инертный газ, т.е. было исключено

взаимодействие образцов с водой первого контура реактора. Рентгенофазовый анализ показал, что образцы монофазны и имеют ГЦК решетку. Мощность дозы гамма-излучения от образцов не превышает 1.65 мкЗв/ч. Основной вклад в радиоактивность образцов вносят изотопы сурьмы, цинка и хрома. При этом радиоактивность образцов по каждому из радионуклидов меньше минимальной значимой активности, что не требует их учета и контроля с точки зрения радиационной безопасности.

Финансирование

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке МНВО РК в рамках НТП «Комплексные фундаментальные исследования по ядерной и радиационной физике, физике высоких энергий и космических лучей для атомной энергии» (ИРН №BR20280986).

Литература

- 1 Plotnikov V.A., Makarov S.V., Bogdanov D.G., Bogdanov A.S. The structure of detonation nanodiamond particles//AIP Conference Proceedings.–2016. –Vol.1785. – Art.No 040045.
- 2 Mochalin V.N., Shenderova O., Dean Ho, Gogotsi Yu. The properties and applications of nanodiamonds // Nature nanotechnology.–2012.–Vol.7. – P.11-23.
- 3 Amita Bedar, Nitesh Goswami, Amit K. Singha, Virendra Kumar, Anil K. Debnath, Debasis Sen, Vinod K. Aswal, Sanjay Kumar, Dhanadeep Dutta, Biju Keshavkumar, Sharwari Ghodke, Ratnesh Jain, Beena G. Singh, Pradeep K. Tewari, Ramesh C. Bindal, Soumitra Kar Nanodiamonds as a state-of-the-art material for enhancing the gamma radiation resistance properties of polymeric membranes//Nanoscale Adv.–2020.–Vol.2.–P.1214-1227
- 4 Dolmatov V.Yu., Ozerin A.N., Kulakova I.I., Bochechka O.O., Lapchuk N.M., Myllymaeki V., Vehanen A. Detonation nanodiamonds: new aspects in the theory and practice of synthesis, properties and applications // Russ. Chem. Rev.–2020.–Vol.–89(12).–P.1428-1462
- 5 Efremov V.P., Zakatilova E.I. Nanodiamond graphitization at heating and irradiation // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. –Vol.1385. –Art.No 012035
- 6 Nesvizhevsky V.V., Köster U., Dubois M., Batische N., Frezet L., Bosak A.B., Gines L. and O. Williams Fluorinated nanodiamonds as unique neutron reflector//Carbon.–2018. –Vol.130.–P. 799-805
- 7 Nesvizhevsky V., Koester U., Dubois M., Batische N., Frezet L., Bosak A., Gines L., Williams O. Fluorinated nanodiamonds as unique neutron reflector// Journal of Neutron Research.–2018. –Vol. 20. – P. 81–82
- 8 Aleksenskii A., Bleuel M., Bosak A., Chumakova A., Dideikin A., Dubois M., Korobkina E., Lychagin E., Muzychka A., Nekhaev G. and et al. Clustering of Diamond Nanoparticles, Fluorination and Efficiency of Slow Neutron Reflectors // Nanomaterials.–2021.–Vol.11. – Art.No 1945.
- 9 Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Chakrov P.V., Kenzhin Ye.A. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei.–2018. –Vol. 81 (10). – P. 1408–1411.
- 10 Shaimerdenov A., Gizatulin S., Dyussambayev D., Askerbekov S., Kenzhina I. The WWR-K reactor experimental base for studies of the tritium release from materials under irradiation // Fusion Science and Technology.– 2020. – Vol.76(3). – P. 304-313
- 11 Sairanbaev D., Koltchnik S., Shaimerdenov A., Tulegenov M., Kenzhin Y., Tsuchiya K. Time History of Performance Parameters of WWR-K Reactor during Gradual Replacement of the Water Reflector by a Beryllium One // Russian Physics Journal. –2021. – Vol. 63. – P. 2165-2177.
- 12 Goorley J.T., et al., 2013. Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934.
- 13 Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., Kahler A.C., Trkov A., Herman M.W. end et. al., ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data // Nuclear Data Sheets. – 2011. – Vol.112. – P.2887-2996.
- 14 COMSOL Multiphysics, 2022. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed 12 May 2023).
- 15 Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71.

References

- 1 V.A. Plotnikov, S.V. Makarov, D.G. Bogdanov and A.S. Bogdanov, AIP Conference Proceedings 1785, 040045 (2016).
- 2 V.N. Mochalin, O. Shenderova, Dean Ho and Yu. Gogotsi, Nature nanotechnology, 7, 11-23 (2012).
- 3 A. Bedar, N. Goswami, A.K. Singha, V.Kumar, A.K. Debnath, D.Sen, V.K. Aswal, Sanjay Kumar, D. Dutta, B. Keshavkumar, Sh. Ghodke, R. Jain, B.G. Singh, P.K. Tewari, R.C. Bindal and S.Kar, Nanoscale Adv., 2, 1214-1227 (2020).
- 4 V.Yu.Dolmatov, A.N.Ozerin, I.I.Kulakova, O.O.Bochechka, N.M.Lapchuk, V.Myllymaeki and A.Vehanen, Russ. Chem. Rev., 89 (12) 1428-1462 (2020).
- 5 V.P. Efremov and E.I. Zakatilova, J. Phys.: Conf. Ser. 1385, 012035 (2019).
- 6 V.V. Nesvizhevsky, U. Köster, M. Dubois, N. Batische, L. Frezet, A.B. Bosak, L. Gines and O. Williams, Carbon 130, 799 (2018).
- 7 V. Nesvizhevsky, U. Koester, M. Dubois, N. Batische, L. Frezet, A. Bosak, L. Gines and O. Williams, Journal of Neutron Research 20, 81–82 (2018).
- 8 A. Aleksenskii, M. Bleuel, A. Bosak, A. Chumakova, A. Dideikin, M. Dubois, E. Korobkina, E. Lychagin, A. Muzychka, G. Nekhaev and et al., Nanomaterials 11, 1945 (2021).
- 9 A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, F.M. Arinkin, Sh.Kh. Gizatuln, P.V. Chakrov, and Ye. A. Kenzhin, Physics of Atomic Nuclei, 81 (10), 1408–1411 (2018).
- 10 A. Shaimerdenov, S. Gizatuln, D. Dyussambayev, S. Askerbekov and I. Kenzhina, Fusion Science and Technology, 76(3), 304-313 (2020).
- 11 D. Sairanbaev, S. Koltochnik, A. Shaimerdenov, M. Tulegenov, Y. Kenzhin and K. Tsuchiya, Russian Physics Journal, 63(12), 2165-2177 (2021).
- 12 J.T. Goorley and et al., Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934 (2013).
- 13 D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote, A.C. Kahler, A. Trkov, M.W. Herman and et. al., Nuclear Data Sheets, 112, 2887-2996 (2011).
- 14 COMSOL Multiphysics, 2022. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed 12 May 2023).
- 15 Gigienicheskie normativi k obespecheniyu radiacionnoi bezopasnosti. Prikaz Ministra zdravoohraneniya Respubliki Kazahstan ot 2 avgusta 2022 goda № KR DSM_71.

История статьи:

Поступила 24 мая 2024 г.

Принята 12 июня 2024 г.

Article history:

Received 24 May 2024

Accepted 12 June 2024

Информация об авторах:

1. **Кылышбек Турлыбекулы** – PhD, Институт ядерной физики (Кazahстан, г. Алматы, email: k.turlybekuly@inp.kz)

2. **Магжан Айткулов** (автор корреспондент) – Институт ядерной физики (Кazahстан, г. Алматы, email: maitkulov@inp.kz)

3. **Жанар Бугыбай** – Институт ядерной физики (Кazahстан, г. Алматы, email: zh.bugybay@inp.kz)

4. **Саулет Аскербеков** – PhD, Институт ядерной физики (Кazahстан, г. Алматы, email: askerbekov@mail.ru)

5. **Асет Шаймерденов** – PhD, Институт ядерной физики (Кazahстан, г. Алматы, email: ashaimerdenov@mail.ru)

Information about authors:

1. **Kylyshbek Turlybekuly** – PhD, Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan, email: k.turlybekuly@inp.kz).

2. **Magzhan Aitkulov** (corresponding author) – Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan, email: maitkulov@inp.kz).

3. **Zhanar Bugybay** – PhD, Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan, email: zh.bugybay@inp.kz).

4. **Saulet Askerbekov** – PhD, Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan, email: askerbekov@inp.kz).

5. **Asset Shaimerdenov** – PhD, Institute of Nuclear Physics (Almaty, Kazakhstan, email: ashaimerdenov@inp.kz).