

УДК 539.16

## ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ НЕЙТРОННЫХ ОБЛУЧЕНИЯХ В БЫСТРОМ БН-600 И ТЕРМОЯДЕРНОМ ДЕМО-С РЕАКТОРАХ

Д.А. Блохин<sup>1</sup>, В.М. Чернов<sup>1</sup>, А.И. Блохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «Лаборатория материалов ИАТЭ», Обнинск, Россия

Рассчитаны ядерно-физические свойства (активация и трансмутация элементов) в диэлектрических материалах BN и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при нейтронном облучении до 5 лет в российских быстром БН-600 и термоядерном ДЕМО-С реакторах при различной длительности охлаждения (до 10 лет) после облучения. Для расчётов использован комплекс ACDAM-2.0. Получены аналитические соотношения для рассчитанных свойств. Результаты могут быть использованы при исследованиях свойств облучённых диэлектрических материалов и для определения условий безопасной работы с ними.

**Ключевые слова:** диэлектрики, нитрид бора, оксид алюминия, нейтронное облучение, активация, трансмутация, газообразование, охлаждение после облучения.

## NUCLEAR AND PHYSICAL PROPERTIES OF DIELECTRICS UNDER NEUTRON IRRADIATIONS IN FAST BN-600 AND FUSION DEMO-S REACTORS

D.A. Blokhin<sup>1</sup>, V.M. Chernov<sup>1</sup>, A.I. Blokhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SC «Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials» (SC «VNIINM»), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Ltd Company «The Materials Laboratory of Institute for Nuclear Power Engineering», Obninsk, Russia

Nuclear and physical properties (activation and transmutation of elements), of dielectrics BN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under neutron irradiation up to 5 years in the Russian fast BN-600 and fusion DEMO-S reactors were calculated using the complex ACDAM-2.0 for different duration of post irradiation cooling up to 10 years. Analytical formulas for the calculated properties were received. The results may be used for the investigations of the properties of the irradiated dielectric materials and the determination of the save conditions of their research.

**Key words:** dielectrics, boron nitride, alumina, neutron irradiation, activation, transmutation, gas accumulation, post irradiation cooling.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-5-11

### ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические материалы разного типа (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, BN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC и др.) с температурой плавления от 2000 (нитрид кремния) до 3000 К (нитрид бора) широко применяются как функциональные (изоляторы, дисперсные упрочняющие частицы в конструкционных сталях и сплавах, защитные покрытия и др.) и конструкционные композитные материалы в ядерных и термоядерных реакторах [1—3]. Показана [3] перспективность использования диэлектриков (BN и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.) как мониторов температуры облучения при внутриреакторном облучении материалов. Экспериментально показано [3], что использование монокристаллического оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и керамики из нитрида бора (BN) позволяет определять температуру внутриреакторного облучения в диапазоне температуры от 370 до 1900 К. Температурные условия облучения определяются с помощью измерений интенсивности оптического поглощения или смещений линий в рентгеновских спектрах облучённых материалов в зависимости от температуры последующего послереакторного отжига. Также показана возможность [3] использования диэлектрических материалов как внутриреакторных мониторов радиационной дозы облучения материалов при исследованиях структуры облучённых диэлектриков высокочувствительными аналитическими методами (оптическими, масс-спектроскопическими), определяющими относительные концентрации изотопов и дефектов с разными изотопными составами (<sup>10</sup>B, <sup>11</sup>B, <sup>7</sup>Li и др.).

В связи с этим представляют интерес расчётные исследования ядерных физических свойств диэлектриков (трансмутация, активация) при их облучении разными нейтронными спектрами в ядерных и термоядерных реакторах. В данной работе исследованы ядерные физические свойства нитрида бора (BN) и

оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) при их облучении в нейтронных спектрах быстрого реактора БН-600 и термоядерного реактора ДЕМО-С (проект НИЦ «Курчатовский институт») [4, 5]. Выбран нейтронный спектр быстрого энергетического реактора БН-600, поскольку этот реактор является в настоящее время практически единственным мировым реактором для высокодозных испытаний материалов термоядерных реакторов, включая диэлектрики.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ РАСЧЁТА

В табл. 1 приведены массовые параметры рассмотренных диэлектриков.

Т а б л и ц а 1. Массовые параметры рассматриваемых диэлектриков

Материал	Молярная масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Нитрид бора (BN)	24,82	2,25
Оксид алюминия ( $Al_2O_3$ )	101,96	3,965

Расчёты наведённой активности облучённых материалов в нейтронных полях реакторов БН-600 и ДЕМО-С были выполнены с использованием программного комплекса ACDAM-2.0 [6]. Были использованы нейтронные активационные сечения и радиационные характеристики радиоактивных ядер из современных версий российских библиотек оцененных ядерных данных ACDAM/ACT и ACDAM/DEC [6, 7], разрабатываемых для расчётного комплекса ACDAM-2.0.

В качестве нейтронных полей были выбраны область центральной части активной зоны быстрого реактора БН-600 и область центральной части первой стенки реактора ДЕМО-С [4, 5]. Время облучения было выбрано до 5 лет, что позволяет проследить временные компоненты набора наведённой активности, накопления трансмутационных элементов, в том числе водорода и гелия, изменения изотопного состава. Время охлаждения радиоактивных материалов после облучения было прослежено до 10 лет для определения времени безопасного обращения с радиоактивными материалами.

Степень радиационной опасности радиоактивных материалов характеризуется двумя величинами [8]:

— активностью радиоактивных веществ, определяемой как скорость распада ядер;

— мощностью дозы  $\gamma$ -излучения, которая сопровождает радиоактивный распад элементов. Данная величина вычислялась как  $\gamma$ -излучение с поверхности радиоактивного материала на расстоянии 1 см от поверхности. Такая величина является ориентиром при определении радиационной опасности от радиоактивных элементов. Согласно принятым нормам радиационной безопасности имеются два уровня мощности суммарной дозы, которые определяют условия обращения с радиоактивными веществами: при уровне мощности дозы менее 0,025 мЗв/ч (hands-on level) радиоактивный материал рассматривается как обычное вещество, и при уровне мощности дозы не более 10,0 мЗв/ч (remote level) радиоактивный материал можно перерабатывать и повторно использовать.

### РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИТРИДА БОРА

На рис. 1, 2 представлены временные зависимости накопления активности (Бк/кг) и мощности дозы  $\gamma$ -излучения (Зв/ч) для нитрида бора для времени облучения до 5 лет в нейтронных спектрах реакторов БН-600 и ДЕМО-С.

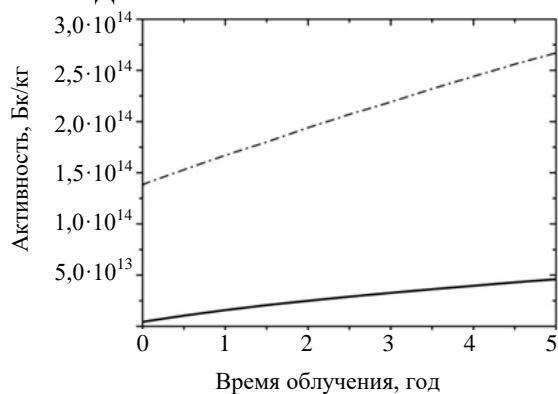


Рис. 1. Временная зависимость накопленной активности нитрида бора для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 (—) и ДЕМО-С (- - -)

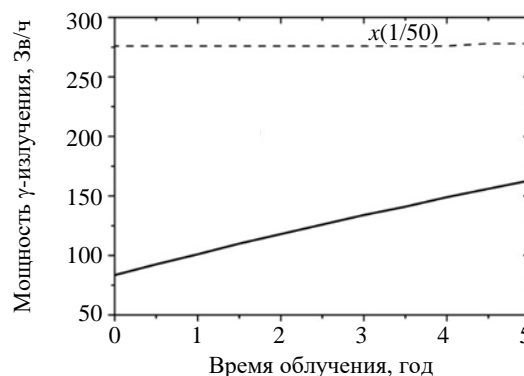


Рис. 2. Временная зависимость накопленной мощности дозы  $\gamma$ -излучения нитрида бора для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 (—) и ДЕМО-С (- - -). Данные для ДЕМО-С уменьшены в 50 раз

Для нитрида бора уже после нескольких часов облучения в ДЕМО-С мощность  $\gamma$ -дозы практически не зависит от времени облучения и равна  $\sim 13\ 800$  Зв/ч (см. рис. 2). Эта величина определяется следующими нуклидами и их вкладом в интегральную величину мощности  $\gamma$ -дозы:  $^{11}\text{Be}$  ( $T_{1/2} = 13,81$  с) — 56,18%,  $^{13}\text{N}$  ( $T_{1/2} = 9,965$  мс) — 34,33%,  $^8\text{Li}$  ( $T_{1/2} = 0,84$  с) — 6,86%.

На рис. 3 представлены временные зависимости спада остаточной радиоактивности для нитрида бора при облучении 5 лет в активной зоне реакторов БН-600 и ДЕМО-С. Время охлаждения определено вплоть до 4000 сут. После окончания облучения при времени охлаждения после 2 ч основным нуклидом, определяющим вклад в накопленную радиоактивность, является изотоп водорода тритий (Т) с временем полураспада  $T_{1/2} = 12,32$  г. Так как распад трития не сопровождается  $\gamma$ -излучением, то после 2 ч выдержки облучённый нитрид бора не имеет вторичного  $\gamma$ -излучения, что и показано на рис. 4. Поэтому после прекращения облучения нитрида бора как в спектре быстрого реактора, так и в термоядерной установке типа ДЕМО-С уже после 2 ч выдержки можно безопасно работать с нитридом бора.

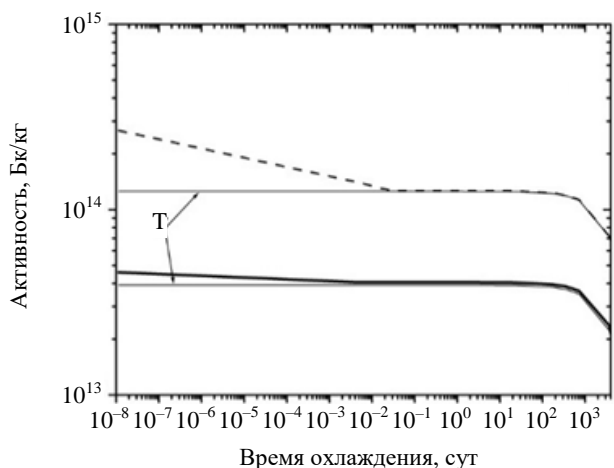


Рис. 3. Временная зависимость спада остаточной радиоактивности для нитрида бора при облучении 5 лет в активной зоне реакторов БН-600 (—) и ДЕМО-С (- - -). Т-линиями указаны соответствующие изменения для трития

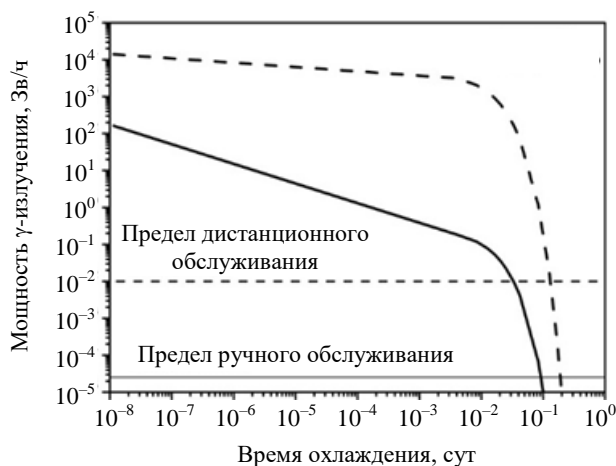


Рис. 4. Временная зависимость спада остаточной  $\gamma$ -активности для нитрида бора при облучении 5 лет в реакторах БН-600 (—) и ДЕМО-С (- - -)

Необходимо также определить изменения изотопного состава нитрида бора, а также скорости накопления водорода и гелия, которые определяют степень радиационной повреждаемости материала в процессе его облучения. На рис. 5 представлены данные об изменении концентрации бора. При облучении в реакторе БН-600 за счёт высокой скорости выгорания изотопа  $^{10}\text{B}$  в реакции  $(n, \alpha)$  за 5 лет облучения его масса уменьшится на 90%, в то же время общая масса бора уменьшится на  $\sim 16\%$ . При облучении в реакторе ДЕМО-С общая масса бора практически не меняется, а масса изотопа  $^{10}\text{B}$  уменьшается на  $\sim 5\%$ .

На рис. 6 показана временная зависимость накопления водорода и гелия в нитриде бора для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С.

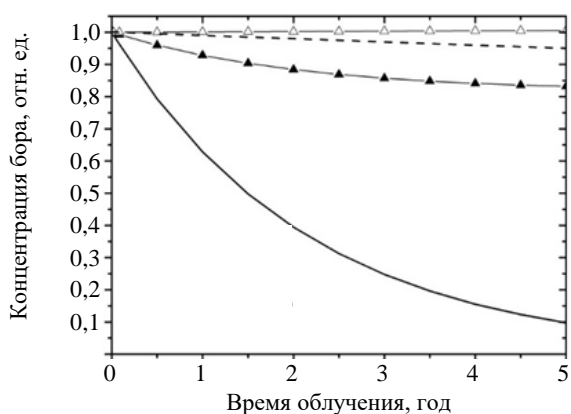


Рис. 5. Временная зависимость выгорания бора и его изотопа бора-10 в нитриде бора для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С:  $\blacktriangle$  — В-nat, БН-600; — — — В-10, БН-600;  $\triangle$  — В-nat, ДЕМО-С; - - - - В-10, ДЕМО-С

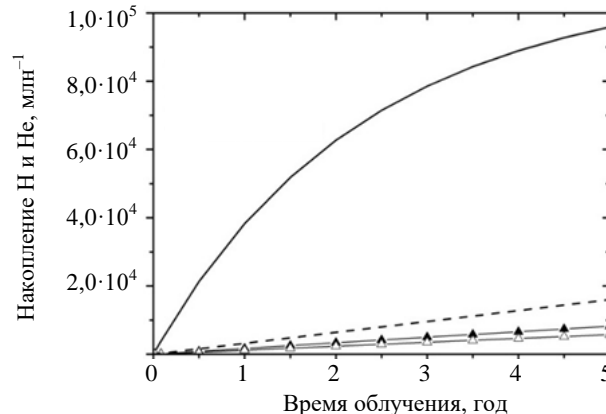


Рис. 6. Временная зависимость накопления водорода и гелия в нитриде бора для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С:  $\blacktriangle$  — Н, БН-600;  $\triangle$  — Н, ДЕМО-С; — — — He, БН-600; - - - - He, ДЕМО-С

В табл. 2 представлен элементный состав облучённого в течение 5 лет нитрида бора в реакторах БН-600 и ДЕМО-С. Анализ полученных в табл. 2 данных показывает, что в нитриде бора в значимых количествах образуются такие элементы, как литий, углерод, гелий и водород. Для углерода приведено также количество изотопа  $^{14}\text{C}$ , образованного, в основном, в реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ . Отметим, что при облучении нитрида бора в реакторе БН-600 практически весь накопленный углерод определяется изотопом  $^{14}\text{C}$ . Для реактора ДЕМО-С накопленный углерод на 60% состоит из  $^{14}\text{C}$ .

Таблица 2. Расчётное изменение элементного состава (вес. %) нитрида бора при облучении в течение 5 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

Элемент	Исходный состав, вес. %	Состав на конец облучения (5 лет), вес. %	
		БН-600	ДЕМО-С
H		0,07298	0,07813
He		3,06739	0,51397
Li		4,99292	0,21999
Be		0,01225	0,05522
B	43,515	36,51309	43,79515
C		0,85114	0,43242
$^{14}\text{C}$		0,84286	0,25309
N	56,485	54,49028	54,9046
O		$9,61797 \cdot 10^{-8}$	$6,12484 \cdot 10^{-8}$

Полученные в табл. 2 данные дают общую картину об изменении элементного композиционного состава нитрида бора, что может служить основой при прогнозировании изменения структурно-фазового состояния и функциональных свойств нитрида бора в процессе его облучения.

### РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

На рис. 7, 8 представлены временные зависимости накопленной активности и мощности дозы  $\gamma$ -излучения в оксиде алюминия для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С.

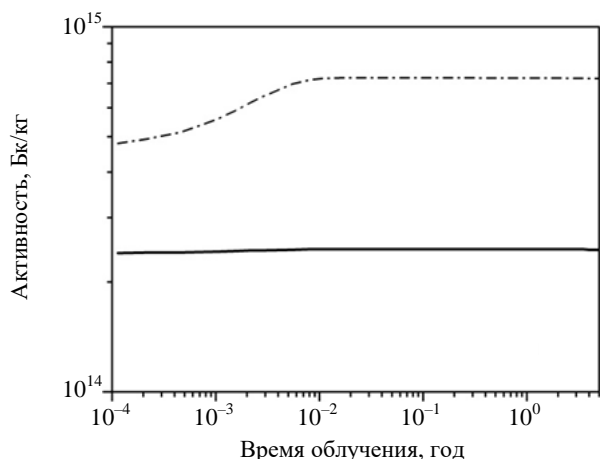


Рис. 7. Временная зависимость накопленной активности в оксиде алюминия для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 (—) и ДЕМО-С (---)

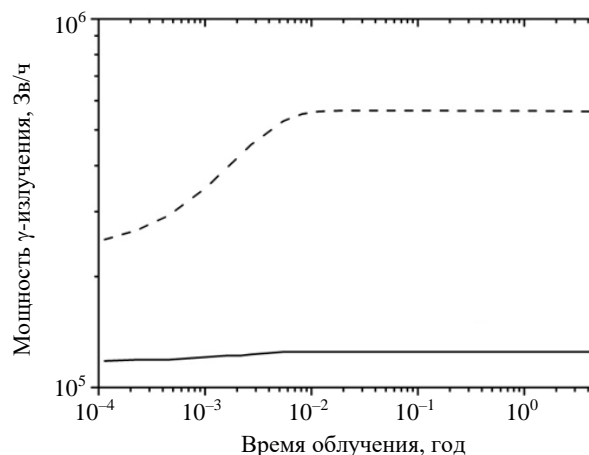


Рис. 8. Временная зависимость накопленной мощности дозы  $\gamma$ -излучения в оксиде алюминия для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 (—) и ДЕМО-С (---)

Представленные на рис. 7 и 8 данные показывают, что наведённая радиоактивность и мощность  $\gamma$ -излучения после первой недели облучения оксида алюминия в реакторах БН-600 и ДЕМО-С достигают определённого постоянного уровня. Анализ вклада образованных в процессе нейтронного облучения радионуклидов приводит к следующим результатам:

— в реакторе БН-600 основными (на 95—98%) изотопами, определяющими наведённую радиоактивность и мощность  $\gamma$ -излучения, являются  $^{28}\text{Al}$  ( $T_{1/2} = 2,24$  мин),  $^{27}\text{Mg}$  ( $T_{1/2} = 9,458$  мин) и  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14,997$  ч);

— в реакторе ДЕМО-С основными (на 97—99%) изотопами, определяющими наведённую радиоактивность и мощность  $\gamma$ -излучения, являются  $^{16}\text{N}$  ( $T_{1/2} = 7,13$  с),  $^{27}\text{Mg}$  ( $T_{1/2} = 9,458$  мин),  $^{24m}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 20,18$  мс) и  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14,997$  ч).

На рис. 9 и 10 представлены временные зависимости спада наведённой радиоактивности и  $\gamma$ -активности для оксида алюминия при облучении в реакторах БН-600 и ДЕМО-С в течение 5 лет и времени охлаждения до 4000 сут.

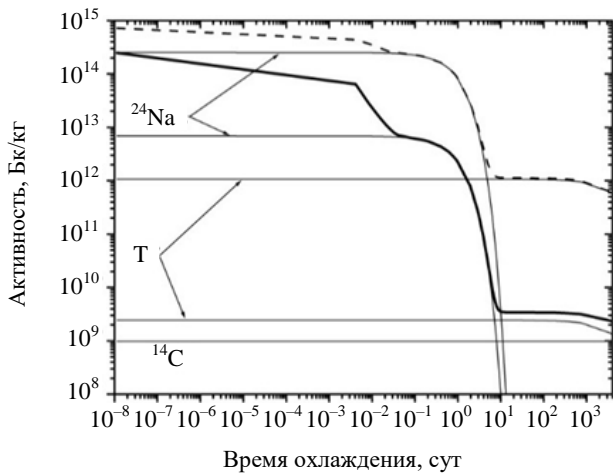


Рис. 9. Временная зависимость спада остаточной радиоактивности для оксида алюминия при облучении до 5 лет в реакторах БН-600 (—) и ДЕМО-С (---). Линиями  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{22}\text{Na}$ , T и  $^{14}\text{C}$  указаны соответствующие зависимости для этих изотопов

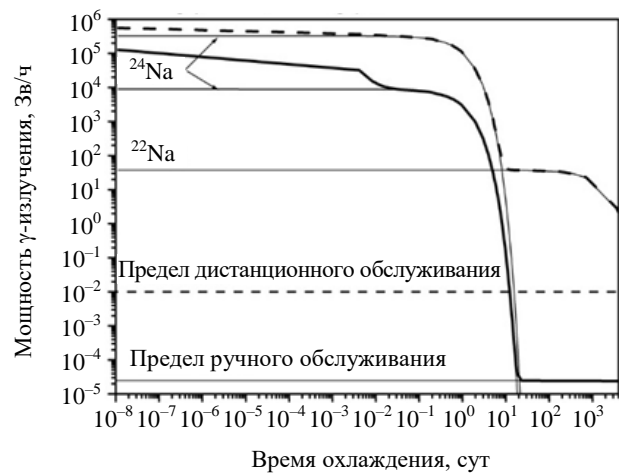


Рис. 10. Временная зависимость спада остаточной  $\gamma$ -активности для оксида алюминия при облучении до 5 лет в реакторах БН-600 (—) и ДЕМО-С (---). Линиями  $^{24}\text{Na}$  и  $^{22}\text{Na}$  указаны соответствующие зависимости для этих изотопов

Из представленных на рис. 9 данных следует:

— в реакторе БН-600 для времени охлаждения до 10 сут практически на 100% спад наведённой радиоактивности определяется изотопом  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14,997$  ч). При времени охлаждения выше 10 сут спад наведённой радиоактивности на 98% определяется двумя изотопами — тритием ( $T_{1/2} = 12,32$  год) и углеродом  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5700$  лет);

— в реакторе ДЕМО-С для времени охлаждения до 10 сут практически на 100% спад наведённой радиоактивности также определяется изотопом  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14,997$  ч). При времени охлаждения выше 10 сут спад наведённой радиоактивности на ~100% определяется тритием ( $T_{1/2} = 12,32$  лет).

Из представленных данных на рис. 10 следует:

— в реакторе БН-600 для времени охлаждения до 15—20 сут практически на 100% спад наведённой  $\gamma$ -активности определяется изотопом  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14,997$  ч). При времени охлаждения выше 20 сут величина наведённой  $\gamma$ -активности становится меньше уровня «hands-on-level», что позволяет считать облучённый материал оксид алюминия нерадиоактивным по критерию  $\gamma$ -излучения;

— в реакторе ДЕМО-С для времени охлаждения до 20 сут практически на 100% спад наведённой  $\gamma$ -активности также определяется изотопом  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14,997$  ч). При времени охлаждения выше 20 сут спад наведённой  $\gamma$ -активности на ~100% определяется изотопом  $^{22}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 2,602$  год) и вплоть до времени охлаждения 4000 сут не достигает уровня «remote level».

На рис. 11 показана временная зависимость накопления водорода и гелия в оксиде алюминия для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С.

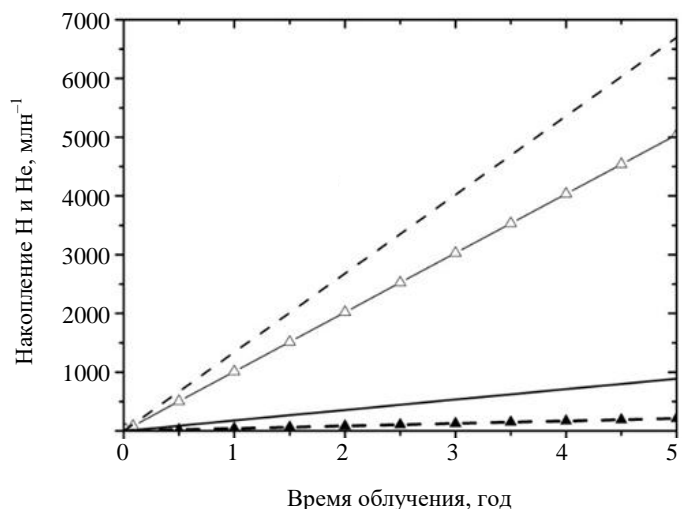


Рис. 11. Временная зависимость накопления водорода и гелия в оксиде алюминия для времени облучения до 5 лет в реакторах БН-600 ( $\blacktriangle$  — H, — — He) и ДЕМО-С ( $\triangle$  — H, - - - - He)

В табл. 3 представлен элементный состав облучённого в течение 5 лет оксида алюминия в реакторах БН-600 и ДЕМО-С. Анализ полученных в табл. 3 данных показывает, что в оксиде алюминия в значимых количествах (выше 0,01 вес. %) образуются такие элементы, как:

- гелий, углерод и кремний в реакторе БН-600;
- гелий, углерод, азот, натрий и магний в реакторе ДЕМО-С.

Т а б л и ц а 3. Расчётное изменение элементного состава (вес. %) оксида алюминия при облучении в течение 5 лет в реакторах БН-600 и ДЕМО-С

Элемент	Исходный состав, вес. %	Состав на конец облучения (5 лет), вес. %	
		БН-600	ДЕМО-С
H	—	0,00109	0,02645
He	—	0,01637	0,13124
Li	—	$5,12705 \cdot 10^{-12}$	$7,65988 \cdot 10^{-8}$
Be	—	$4,29756 \cdot 10^{-6}$	$3,6576 \cdot 10^{-4}$
B	—	$1,50218 \cdot 10^{-8}$	$2,13172 \cdot 10^{-5}$
C	—	0,05086	0,32905
N	—	$4,42768 \cdot 10^{-6}$	0,01333
O	47,065	46,9981	46,62469
F	—	$1,38755 \cdot 10^{-7}$	$3,78049 \cdot 10^{-6}$
Ne	—	$1,22295 \cdot 10^{-6}$	$7,73991 \cdot 10^{-4}$
Na	—	$4,13256 \cdot 10^{-6}$	0,01549
Mg	—	0,00468	0,51159
Al	52,935	52,78354	52,34537
Si	—	0,14543	0,00145
P	—	$1,63959 \cdot 10^{-10}$	$9,96185 \cdot 10^{-18}$
S	—	$4,05181 \cdot 10^{-14}$	—

Полученные в табл. 3 данные дают общую картину об изменении элементного композиционного состава оксида алюминия, что может служить основой при прогнозировании изменения структурно-фазового состояния и функциональных свойств оксида алюминия в процессе его облучения.

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении различного рода инженерных расчётов и определении условий безопасной работы с облучёнными образцами необходимы аналитические зависимости от времени облучения радиационных характеристик. В области времени облучения от 1 ч до 5 лет полученные в данной работе расчётные данные были аппроксимированы полиномами вида  $F = A_0 + A_1t + A_2t^2 + A_3t^3$ , где  $t$  — время облучения в годах.

В табл. 4 приведены такие аналитические аппроксимирующие соотношения с численными коэффициентами  $A_0, A_1, A_2$  и  $A_3$  для времени облучения в реакторах от 1 ч до 5 лет.

Т а б л и ц а 4. Аналитические соотношения, полученные при аппроксимации расчётных данных для времени облучения  $t$  (год,  $0,01 < t < 5$ )

Параметр	БН-600	ДЕМО-С
Нитрид бора BN		
Временная зависимость накопленной активности, Бк/кг (рис. 1)	$1,28 \cdot 10^{13}t - 1,4210^{12}t^2 + 1,08 \cdot 10^{11}t^3$	$1,38 \cdot 10^{14} + 2,95 \cdot 10^{13}t - 8,97 \cdot 10^{11}t^2 + 3,05 \cdot 10^{10}t^3$
Временная зависимость накопленной мощности дозы $\gamma$ -излучения, Зв/ч (рис. 2)	$18,46t - 0,62t^2 + 0,023t^3$	$\sim 1,38 \cdot 10^4$
Временная зависимость накопления водорода, млн <sup>-1</sup> (рис. 6)	$1650,18t$	$1154,33t$
Временная зависимость накопления гелия, млн <sup>-1</sup> (рис. 6)	$45\,487,71t - 8175,55t^2 + 584,85t^3$	$3201,26t$
Временная зависимость выгорания изотопа бора-10, отн. ед. (рис. 5)	$1,0 - 0,45t + 0,08t^2 - 0,006t^3$	$1,0 - 0,01t$
Временная зависимость выгорания бора, отн. ед. (рис. 5)	$1,0 - 0,09t + 0,02t^2 - 0,001t^3$	$1,0 + 0,0012t$
Оксид алюминия Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Временная зависимость накопленной активности, Бк/кг (рис. 7)	$\sim 2,45 \cdot 10^{14}$	$\sim 7,24 \cdot 10^{14}$
Временная зависимость накопленной мощности дозы $\gamma$ -излучения, Зв/ч (рис. 8)	$\sim 1,25 \cdot 10^5$	$\sim 5,60 \cdot 10^5$
Временная зависимость накопления водорода, млн <sup>-1</sup> (рис. 11)	$42,43t$	$1008,63t$
Временная зависимость накопления гелия, млн <sup>-1</sup> (рис. 11)	$177,85t$	$1339,78t$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием расчётного комплекса ACDAM-2.0 получены ядерные физические характеристики диэлектрических материалов BN и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при их облучении в нейтронных спектрах быстрого БН-600 и термоядерного ДЕМО-С (проект НИЦ «Курчатовский институт») реакторов.

Для времени нейтронного облучения до 5 лет определены уровни наведённой активности и изменений элементных (изотопных) составов материалов. Для времени до 10 лет после облучения определены скорости радиационного охлаждения и уровни остаточной активности облучённых материалов.

Получены аналитические соотношения, аппроксимирующие полученные результаты, которые могут быть использованы для инженерных расчётов и определения условий безопасной работы с облучёнными материалами.

Полученные результаты дают целостную картину динамики ядерно-физического поведения диэлектриков на основе нитрида бора и оксида алюминия при облучении до 5 лет в нейтронных спектрах быстрых (на примере БН-600) и термоядерных (на примере ДЕМО-С) реакторов и послереакторного охлаждения до 10 лет.

## REFERENCES

1. **Chernov V.M., Khorasanov G.I., Plaksin O.A., Stepanov V.A., Stepanov P.A., Belyakov V.A.** Electrical and optical characteristics of dielectrics for fusion use under irradiation. — *J. Nucl. Mater.*, 1998, vol. 253, pp. 175—179.
2. **Stepanov V.A., Chernov V.M.** Radiation-induced processes and their influence on the functional properties of dielectrics for different types of irradiation. — *J. Nucl. Mater.*, 2000, vol. 283/287, pp. 932—936.
3. **Stepanov V.A., Isaev E.I., Kryukova L.M., Plaksin O.A., Stepanov P.A., Chernov V.M.** The high-dose and high-temperature monitors of reactor irradiation based on insulators. — *Nucl. Energy and Technology*, 2015, vol. 1, pp. 93—98.
4. **Blokhin A.I., Demin N.A., Chernov V.M.** Neutron sources for structural materials study. — *VANT. Ser. Materialovedenie i novye materialy (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Material authority and new materials)*, 2006, issue 1(66), pp. 70—87 (in Russian).
5. **The basic concept** of the DEMO-S demonstration fusion power reactor. Project RF DEMO. Construction description of reactor systems and operation modes. Part IV. Ed. A.A. Borisov, G.E. Shatalov. — M., 2000. 1440 p. (in Russian).
6. **Blokhin A.I., Demin N.A., Manokhin V.N., Sipachev I.V., Blokhin D.A., Chernov V.M.** Software package ACDAM-2.0 for investigation of nuclear physical properties of materials in conditions of neutron irradiation. — *VANT. Ser. Materialovedenie i novye materialy (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Material authority and new materials)*, 2015, issue 3(82), pp. 81—109 (in Russian).
7. **Blokhin A.I., Blokhin D.A., Manokhin V.N., Buleeva N.N., Sipachev I.V.** BROND-3/A — library of neutron cross sections for research of materials activation and transmutation. — *VANT. Ser. Yadernye konstanty (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Nuclear constants)*, 2011—2012, issue 1—2, pp. 3—7 (in Russian).
8. **Radiation safety norms** NRB-99/2009. Sanitary rules and regulations SanPin 2.6.1.2523-09. Acceptance criteria for the disposal of radioactive waste NP-093-14 (in Russian).

## AUTHORS

**Blokhin D.A.** SC «Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials» (SC «VNIINM»), Rogova ul. 5a, 123060 Moscow, Russia; DABlokhin@bochvar.ru

**Chernov V.M.** SC «Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials» (SC «VNIINM»), Rogova ul. 5a, 123060 Moscow, Russia; VMChernov@bochvar.ru

**Blokhin A.I.** Lt'd Company «The Materials Laboratory of Institute for Nuclear Power Engineering», Pyatkinskiy proezd 12, 249030 Obninsk, Kaluga reg., Russia; blokhin@obninsk.ru

Received 6 June 2016  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 3, pp. 5—11.