

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
И ДИФФУЗИЯ

УДК 621.039.53

АНАЛИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТРАНСМУТАЦИИ  
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВАНАДИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2023 г. А. Р. Белозерова<sup>а</sup>, \*, С. В. Белозеров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>АО «ГНЦ НИИАР», Западное шоссе, 9, Димитровград, Ульяновская область, 433510 Россия

\*e-mail: lnni@niiar.ru

Поступила в редакцию 26.07.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Рассмотрены эффекты ядерной трансмутации в сплавах на основе ванадия при облучении в различных реакторных установках, включая РБН (реакторы на быстрых нейтронах): (1) БОР-60 (Быстрый Опытный Реактор), (2) EBR-II (Experimental Breeder Reactor), и ТЯР (термоядерный реактор синтеза) – (3) ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Представлено сравнение скоростей ядерной трансмутации для анализируемых сплавов системы  $[V-x\% Cr (Ni)-y\% Ti]$  средствами аналитики Data Mining. Показано, что доминирующие типы взаимодействий нейтронов с испытываемыми материалами коррелируют с уровнем термализации нейтронного спектра реактора, влияющего на значения скоростей ядерной трансмутации, что приводит к различиям в конечном химическом составе сплавов после облучения.

*Ключевые слова:* ядерная трансмутация, ванадиевые сплавы, моделирование кинетики нуклидных превращений, типы ядерных взаимодействий, исследовательский реактор, энергетический реактор, облучение

DOI: 10.31857/S0015323022601003, EDN: HKDOUM

ВВЕДЕНИЕ

В ядерной энергетике ванадиевые сплавы, в основном, предлагаются к применению в качестве конструкционных материалов (КМ) твэлов и других элементов активной зоны реакторов на быстрых нейтронах (РБН) в различных условиях эксплуатации, в том числе, в условиях длительно облучения при повышенных температурах в контакте с жидкометаллическим теплоносителем. Одно из перспективных направлений исследований – получение радиационно-стойких ванадиевых сплавов с оптимальным сочетанием жаропрочности и удовлетворительной свариваемости. В состав этой группы входят сплавы, легированные титаном, хромом, молибденом, цирконием и углеродом. Особое внимание уделяется сплавам ванадия системы  $[V-x\% Cr (Ni)-y\% Ti]$  как материалам, наиболее удовлетворяющим предъявляемым требованиям для работы в активной зоне РБН, в том числе, с целью реализации технологии замкнутого топливного цикла и увеличения глубины выгорания топлива [1, 2]. Немаловажную роль при выборе ванадиевых сплавов в качестве КМ играет и характерный для них быстрый спад наведенной радиоактивности.

Ванадиевые сплавы характеризуются высокой жаропрочностью, радиационной стойкостью, ма-

лой плотностью, оптимальными ядерно-физическими параметрами, достаточно технологичны и при определенных условиях достаточно стойки в агрессивных средах жидко-металлического теплоносителя [3]. Сплавы ванадия также применяются в качестве радиационно-стойких, жаропрочных припоев для тугоплавких материалов. Они образуют герметичные по литию паяные соединения, могут длительно работать в агрессивных средах до 1200°C [4, 5].

В последнее время стала актуальной задача выбора КМ для термоядерного реактора синтеза (ТЯР), способных выдерживать воздействие уникального по своему сочетанию набора жестких повреждающих факторов, каждый из которых способен вызвать существенное ухудшение физико-механических и эксплуатационных характеристик [6]. В связи с этим интерес к ванадию и его сплавам вышел на уровень практического применения в качестве КМ для проектируемых установок термоядерного синтеза. В России так же, как и в других странах, ведутся исследования по подбору, аттестации и обоснованию работоспособности КМ на основе ванадия в составе энергонапряженных элементов ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) [7]. Вместе с тем успешность применения ванадиевых

**Таблица 1.** Химический состав ванадиевых сплавов

Сплав	Элемент	Содержание, ат. %
VL63 (сплав V–5Cr–5Ti)	V	90.3
	Cr	4.6
	Ti	5.1
VL47 (сплав V–4Cr–4Ti)	V	91.8
	Cr	3.9
	Ti	4.2
	Si	0.09
Модельный кристаллит (сплав V–Cr–Ti)	V	87.5
	Cr	6.25
	Ti	6.25
V–1Ni	V	99.0
	Ni	1.0
V–10Ti	V	90.0
	Ti	10.0
V–10Ti–1Ni	V	89.0
	Ti	10.0
	Ni	1.0

сплавов в РБН существенным образом зависит от стабильности комплекса уникальных свойств материалов данного класса при облучении, что в большой степени определяется кинетикой изменений состава ванадиевых сплавов при достижении больших повреждающих доз (более 150 сна).

Поскольку действующего высокопоточного источника нейтронов с энергией 14 МэВ не существует, влияние нейтронного облучения на свойства и пределы работоспособности материалов-кандидатов для первой стенки/бланкета в настоящее время исследуется в реакторах деления [8]. Нейтронное облучение приводит к ядерной трансмутации, которая изменяет химический состав и, следовательно, свойства материала. Вероятность протекания трансмутации по разным каналам ядерного взаимодействия весьма чувствительна к энергии нейтронов, поэтому в первом приближении ядерные реакции разделяют по двум основным вкладам: от тепловых нейтронов через реакцию ( $n, \gamma$ ) с возможным последующим распадом образовавшихся продуктов и от быстрых нейтронов через реакции порогового типа [( $n, np$ ), ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ), ( $n, 2n$ ) и т.д.] [9].

Профили смешанного и быстрого нейтронных спектров совершенно разные, и, следовательно, эффекты при облучении материалов с разными профилями нейтронных спектров имеют существенные отличия. В реакторах на промежуточных нейтронах, как правило, присутствует большое число нейтронов с низкой энергией и очень мало нейтронов с энергией выше 3 МэВ [10]. РБН имеют малое число нейтронов с низкой энергией и большое

число нейтронов с энергией от 0.1 до 3 МэВ [11, 12]. В реакторе термоядерного синтеза вблизи плазмы имеется относительно небольшое число нейтронов с низкой энергией и относительно большое число нейтронов с энергией выше 10 МэВ. Отмеченные особенности приводят к различным ядерным реакциям, протекающим в ванадиевых сплавах при облучении в этих условиях [13].

Цель работы – сравнить скорости накопления/убыли основных элементов в системе [V– $x\%$  Cr (Ni)– $y\%$  Ti] при облучении в реакторах деления и синтеза (в типичных спектрах РБН и ИТЕР) на основе расчетных исследований кинетики трансмутационных превращений.

### ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В данном анализе рассматривается ряд перспективных материалов на основе ванадия в системе [V– $x\%$  Cr (Ni)– $y\%$  Ti], химические составы которых приведены в табл. 1. Их радиационная стойкость к облучению была, в частности, в центре внимания интенсивной программы испытаний для выбора наилучшего варианта КМ для ИТЕР. Ванадиевые сплавы относятся к малоактивируемым материалам, что является несомненным их достоинством, но возможности оптимизации составов этих сплавов остаются и требуют дополнительных исследований.

### УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ

Расчёты трансмутаций в ванадиевых сплавах проводились с различными нейтронно-физическими условиями облучения в реакторных установках, характеристики которых представлены в табл. 2. Указаны полная плотность потока нейтронов на рассматриваемых позициях облучения и скорости набора повреждающей дозы в ванадиевых сплавах при типичных спектрах РБН и ИТЕР, определяющие разброс в окрестности среднего значения, коррелирующий с вариативностью химических составов из изучаемого перечня материалов системы [V– $x\%$  Cr (Ni)– $y\%$  Ti].

Характеристики облучения ванадиевых сплавов, используемых как КМ первой стенки и бланкета, исследуют с использованием облучательных установок в реакторах на быстрых нейтронах. Однако действующие реакторы с жидкометаллическим охлаждением не имеют температуры теплоносителя ниже 300°C. Это создает проблему для оценки характеристик разрушения и других механических свойств ванадиевых сплавов для таких устройств, как ИТЕР, в которых первая стенка и бланкет будут работать, предположительно, при температуре 200°C.

Облучение в исследовательских реакторах, работающих с температурой теплоносителя ниже 100°C, приводит к нежелательным трансмутаци-

**Таблица 2.** Основные характеристики реакторов

Характеристика	Реактор		
	БОР-60 [12, 14]	ЕБР-II [15]	ITER [16]
Плотность потока нейтронов энергии $E \geq 0.2$ эВ, $\times 10^{15}$ , $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	3.7	2.5	0.3 [17]
Тепловая мощность, МВт	50	20	0.7
Сплав	Скорость набора повреждающей дозы при работе испытательной установки на полной мощности, сна/с		
V–10Ti	$1.9 \times 10^{-6}$	$9.7 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
V–10Ti–1Ni	$1.9 \times 10^{-6}$	$9.7 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
V–1Ni	$2.0 \times 10^{-6}$	$9.9 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
VL47	$1.9 \times 10^{-6}$	$9.8 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
VL63	$1.9 \times 10^{-6}$	$9.7 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
V-металл	$2.0 \times 10^{-6}$	$9.9 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
Модельный кристаллит	$1.9 \times 10^{-6}$	$9.7 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$

ям ванадия в хром при наличии потока тепловых нейтронов. В РБН и ТЯР ванадиевые сплавы менее подвержены ядерной трансмутации по реакции радиационного захвата на ванадии. Чтобы преодолеть эту проблему, экспериментальные капсулы, содержащие образцы ванадия, должны быть окружены подходящими экранами для защиты от тепловых нейтронов. Из различных материалов, имеющих большие сечения захвата тепловых нейтронов, удовлетворительными являются бор или соединения бора, содержащие  $^{10}\text{B}$ , чистый кадмий (Cd), гадолиний (Gd) и европий (Eu) или соединения, содержащие эти элементы [18].

### АНАЛИТИКА СХЕМ НУКЛИДНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ СРЕДСТВАМИ POWER BI DESKTOP

Разветвленная блочная схема нуклидных превращений в соответствии с рис. 1, позволяет провести расчеты с большим объемом каналов ядерных реакций. При этом каждый расчет можно рассматривать как транзакцию, в которой прописаны информационные особенности моделирования исследуемых ядерно-физических процессов и результаты их влияния на физические и эксплуатационные свойства КМ. Огромную коллекцию таких транзакций интеллектуальный анализ данных (Business intelligence (BI), Data Mining, Data Science) может превратить из большого набора данных в знания, которые, как правило, нетривиальны.

Из средств BI было выбрано Microsoft Power BI Desktop. Power BI Desktop – это свободно распространяемый инструмент для создания визуальных аналитических панелей мониторинга, который использует базы данных (БД) с технологиями и возможностями управления транзакциями, по-

иском информации и анализом данных [19]. Инструменты OLAP (On-Line Analytical Process – интерактивная аналитическая обработка) поддерживают многомерный анализ на основе OLAP-куба [20], где в нашем случае таблица фактов – это данные транзакций, полученные из расчетов средствами математического моделирования кинетики нуклидных превращений по комплексу программ UPM [21, 22] PREPRO-2017 [23] FENDL-2.0 [24] ENDF/B-VII.0 [25]. PREPRO-2017 – пакет утилит для предварительной обработки ядерных данных в формате ENDF/B, FENDL-2.0 – библиотека ядерных данных по взаимодействию нейтронов с ядрами атомов; ENDF/B-VII.0 – библиотека с константами по распадам радионуклидов, а таблицы измерений – это данные БД, связанные с таблицей фактов при помощи ключей [26].

Расчеты проведены на основе модели изонуклидной трансмутации элементов, ранее успешно апробированной при расчетах трансмутации в сталях аустенитного класса [27] и в циркониевых сплавах [28].

### ТРАНСМУТАЦИЯ В СИСТЕМЕ [V–x% Cr(Ni)–y% Ti]

Дозы облучения ванадиевых сплавов были ограничены порогами 100 и 150 сна для всех облучательных установок при рабочей мощности и непрерывном облучении. Содержание элементов в ванадиевых сплавах в зависимости от набранного флюенса нейтронов и дозы повреждения представлены в табл. 3.

Сравнение характеристик облучения в условиях облучения нейтронами деления и термоядерного синтеза интересно из-за различий в транс-

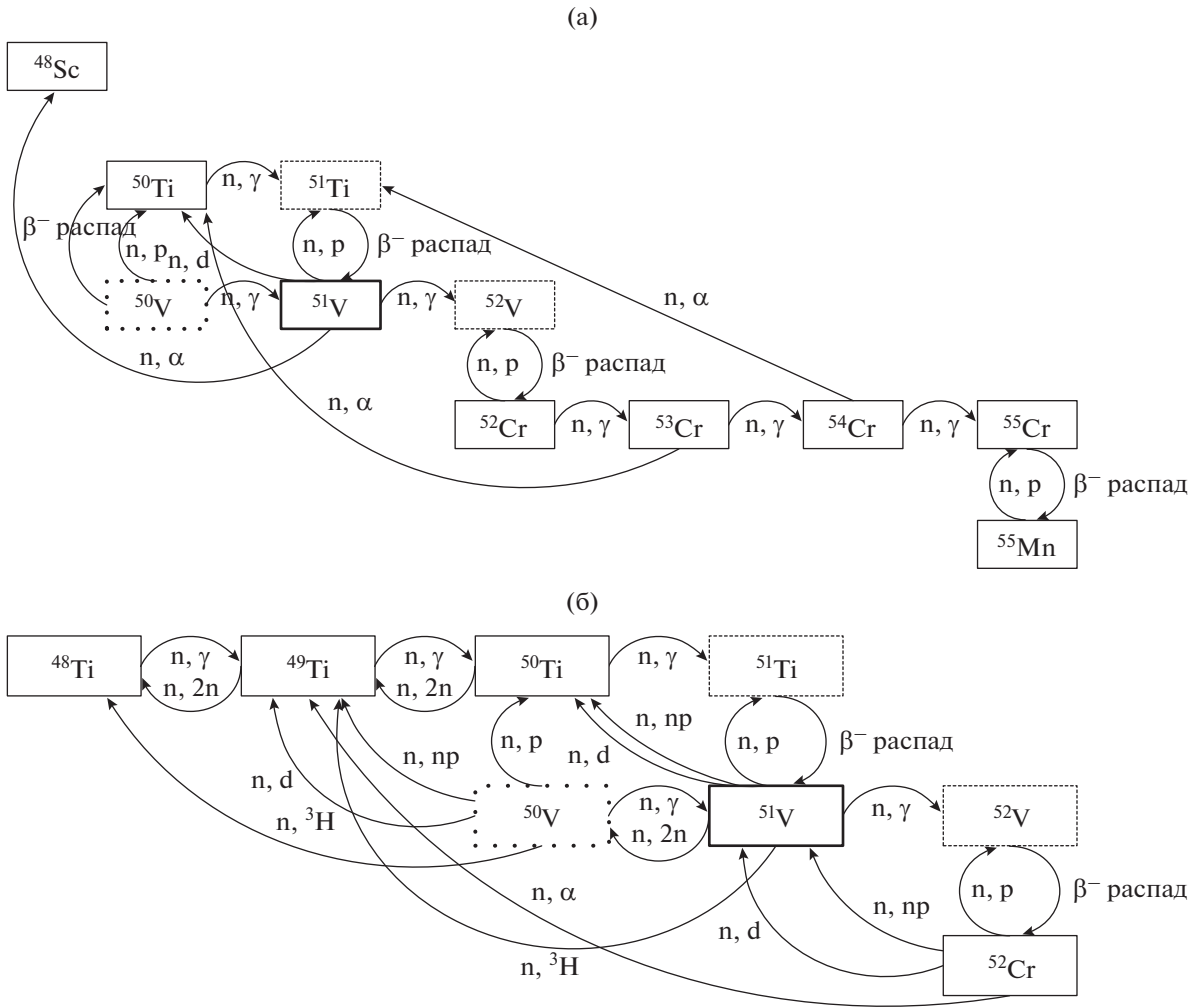
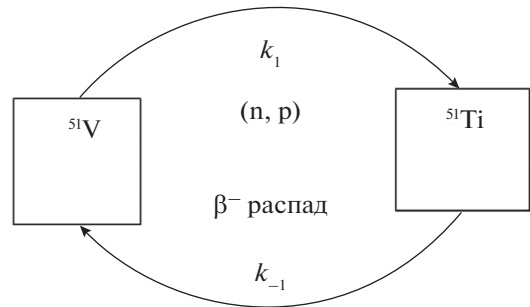


Рис. 1. Принципиальная схема нуклидных превращений для ванадия при облучении в: (а) БОР-60, (б) ITER.

мутационном поведении ванадиевых сплавов. Нейтроны в условиях термоядерного синтеза, слабо вызывающие ядерные реакции в ванадиевых сплавах, создают слабую активацию материала. Кинетика нуклидных превращений в ванадиевых сплавах при нейтронно-физических условиях реакторов на быстрых нейтронах представляет собой процесс последовательного образования из родительского нуклида V-51 дочернего нуклида V-52, который потом распадается в стабильный Cr-52 по цепочке:  $^{51}\text{V}(n, \gamma)^{52}\text{V} \xrightarrow{\beta^- \text{ распад}} ^{52}\text{Cr}$  (период полураспада 3.75 мин). Доля исходного хрома в составе ванадиевого сплава практически сохраняется с незначительными потерями по распаду  $^{51}\text{Cr} \xrightarrow{\beta^+ \text{ распад}} ^{51}\text{V}$  (период полураспада 27.701 дней). Важной особенностью облучения ванадиевых сплавов в РБН является то, что с ростом флюенса содержание основных элементов практически квазистабильно из-за присутствия

обратимых парных ядерных взаимодействий, таких как, например:



где  $k_1 \ll k_{-1}$ ;  $k_1$  – значение скорости ядерного взаимодействия по каналу (n, p), [ $\text{с}^{-1}$ ];  $k_{-1}$  – постоянная  $\beta^-$  – распада (период полураспада 5.76 мин).

Кинетика нуклидных превращений в ванадиевых сплавах при нейтронно-физических условиях реактора синтеза является процессом параллельного образования из родительского нуклида

**Таблица 3.** Изменение концентрации элементов в ванадиевых сплавах в зависимости от дозы облучения

Сплав	Элемент	Концентрации, млн <sup>-1</sup>	Реактор					
			БОР-60		ЕВР-II		ITER	
			$Ft, \text{см}^{-2}$ $1.9 \times 10^{23}$	$Ft, \text{см}^{-2}$ $2.9 \times 10^{23}$	$Ft, \text{см}^{-2}$ $2.6 \times 10^{23}$	$Ft, \text{см}^{-2}$ $3.9 \times 10^{23}$	$Ft, \text{см}^{-2}$ $7.8 \times 10^{23}$	$Ft, \text{см}^{-2}$ $1.2 \times 10^{23}$
доза, сна			100	150	100	150	100	150
BL63	V	89.8	89.6	89.5	89.4	89.2	89.6	89.5
(сплав	Cr	4.9	5.1	5.2	5.3	5.5	4.9	4.9
V-5Cr-5Ti)	Ti	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.5	5.6
BL47	V	91.5	91.3	91.2	91.1	91.0	91.3	91.2
(сплав	Cr	3.8	4.0	4.1	4.2	4.6	3.8	3.8
V-4Cr-4Ti)	Ti	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.7	4.8
	Si	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Модельный кри-	V	87.3	87.1	87.0	86.9	86.7	87.1	87.0
сталлит (сплав	Cr	6.1	6.3	6.4	6.5	6.7	6.1	6.1
V-Cr-Ti)	Ti	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.8	6.9

V-51 дочерних нуклидов Ti-50 и V-50 с последующим образованием Ti-49 из последних.

Следует отметить, что появление новых атомов в сплаве происходит практически полностью за счет ванадия. В свою очередь, хром и титан, образующиеся из ванадия в результате облучения в РБН и ТЯР соответственно, влияют на физико-механические свойства ванадиевого сплава.

Анализ влияния ядерно-физических процессов на изменения химического состава ванадиевых сплавов показывает, что повреждение ванадиевых сплавов в зависимости от такого фактора как ядерная трансмутация основного состава не значимо. Можно предположить, что повреждение ванадиевых сплавов каскадным разупорядочиванием атомов металла и образованием дефектов возможно за счет миноритарных трансмутационных примесей таких, как например Mo.

## ВЫВОДЫ

1. Оценены доминирующие каналы нуклидных превращений при облучении:

- в РБН (БОР-60, ЕВР-II) последовательная схема нуклидных превращений – родительский нуклид V-51 служит источником образования дочернего нуклида V-52, который потом распадается в стабильный Cr-52;

- в ITER параллельная схема нуклидных превращений – родительский нуклид V-51 служит источником образования дочерних нуклидов Ti-50 и V-50 с последующим образованием Ti-49 из последних.

2. Изменение химического состава основных промышленных ванадиевых сплавов происходит практически полностью за счет ванадия.

3. Скорости трансмутации элементов проанализированных ванадиевых сплавов при облучении в ЕВР-II, БОР-60 являются величинами одного порядка и превышают величину скорости трансмутации элементов для условий облучения в ITER.

4. Проведенные расчеты могут служить основанием в разработке малоактивируемых ванадиевых сплавов для РБН и ТЯР.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никулин С.А., Вотинов С.Н., Рожнов А.Б. Ванадиевые сплавы для ядерной энергетики // М.: НИТУ МИСиС, 2014. 206 с.
2. Калинин Б.А., Стальцов М.С., Тищенко А.Г., Чернов И.И. Сплавы ванадия на пороге широкого применения в энергетике // Цветные металлы. 2016. № 11(887). С. 77–86.
3. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. 4-е изд. М.: Атомиздат, 1979.
4. Петунин В.П. Теплоэнергетика ядерных установок. М.: Атомиздат, 1960.
5. Transmutation and Nuclear Energy, Rice University. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openstax.org/books/chemistry-2e/pages/21-4-transmutation-and-nuclear-energy> (дата обращения 05.08.2022).
6. Радиационное воздействие на материалы термо-ядерных реакторов. Труды второй международной конференции / ЦНИИ КМ “Прометей”, Санкт-Петербург. 1992.
7. Mukhin E.E., Nelyubov V.M., Yukish V.A., Smirnova E.P., Solovei V.A., Kalinina N.K., Nagaitsev V.G., Valishin M.F., Belozherova A.R., Enin S.A., Borisov A.A.,

- Deryabina N.A., Khripunov V.I., Portnov D.V., Babinov N.A., Dokhtarenko D.V., Khodunov I.A., Klimov V.N., Razdobarin A.G., Alexandrov S.E., Elets D.I., Bazhenov A.N., Bukreev I.M., Chernakov An.P., Dmitriev A.M., Ibragimova Y.G., Koval A.N., Kurskiev G.S., Litvinov A.E., Nikolaenko K.O., Samsonov D.S., Senichenkov V.A., Smirnov R.S., Tolstyakov S.Yu., Tereschenko I.B., Varshavchik L.A., Zhiltsov N.S., Mokeev A.N., Chernakov P.V., Andrew P., Kempnaars M.* Radiation tolerance testing of piezoelectric motors for ITER (first results) // *Fusion Eng. Des.* 2022. V. 176. P. 113017.
8. *Белозерова А.Р., Шиманский Г.А.* Моделирование активационных процессов в сплавах меди при реакторном облучении // Перечень докладов IX Российской конференции по реакторному материаловедению [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://niiar.ru/sites/default/files/conf\\_rm\\_09\\_list\\_niia.pdf](http://niiar.ru/sites/default/files/conf_rm_09_list_niia.pdf) (дата обращения 10.02.2022).
  9. *Gomes I.C., Smith D.L.* Transmutations of elements under irradiation and its impact on alloys composition // *Fusion materials semiannual progress report for the period ending March.* Oak Ridge National Lab., TN (United States), 1994. Sep. P. 33–42.
  10. *Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А., Пименов В.В., Чертков Ю.Б.* Модернизация активной зоны реактора СМ для решения задач материаловедения // *Атомная энергия.* 2003. Т. 93. № 3. С. 167.
  11. *Гаджиев Г.И., Маркина Н.В., Рязанов Д.К., Теллин А.И.* Экспериментальное изучение пространственно-энергетического распределения нейтронов в реакторе БОР-60 // *Препринт.* Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. № 1(853).
  12. *Izhutov A.L., Krashennnikov Yu.M., Zhemkov I.Y., Varivtsev A.V., Naboishchikov Yu.V., Neustroev V.S., Shamardin V.K.* Prolongation of the BOR-60 reactor operation // *Nuclear Engineering and Technology.* 2015. Т. 47. № 3. С. 253–259.
  13. *Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н.* Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления, генераторы 14 МэВ нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, устройства, конвертирующие нейтронное излучение: Справочник под ред. В. Д. Севастьянова. Изд. 2-е, перераб., и доп. Т. 2. Менделеево: ФГУП “ВНИИФТРИ”, 2014. 356 с.; ISBN 978-5-903232-39-0.
  14. Реактор на быстрых нейтронах БОР-60 / Характеристики [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.niia.ru/bor\\_60\\_characteristics](http://www.niia.ru/bor_60_characteristics) (дата обращения 19.10.2022). АО “ГНЦ НИИАР”, Яндекс метрика.
  15. EBR-II. Sixteen Years Of Operation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://inldigitalibrary.inl.gov/Reports/ANL-0001.pdf> (дата обращения 19.10.2022). Argonne National Laboratory – West, Idaho 83401, May 1980.
  16. *Cierjacks S., Ehrlich K., Cheng E. T., Conrads H., Ullmaier H.*, High-Intensity Fast Neutron Sources and Neutron Fields for Fusion Technology and Fusion Materials Research // *Nucl. Sci. Eng.* 1990. V. 106. P. 99–113.
  17. *Орлинский Д.В.* Диагностика плазмы в термоядерном реакторе и проблема радиационной стойкости элементов диагностических систем / Радиационное воздействие на материалы термоядерных реакторов. Труды второй международной конференции. Санкт-Петербург, Сентябрь, 21–24, 1994. С. 73–78.
  18. *Lillie R.A.* Calculations to determine the feasibility of using a boron carbide shield for spectral tailoring in the hfir for vanadium alloy irradiation // *Fusion materials semiannual progress report for the period ending March.* Oak Ridge National Lab., TN (United States), Sep. 1994. P. 43–46.
  19. *Белозерова А.Р., Щеколдин В.В.* Бизнес-аналитика схем нуклидных превращений в Power BI Desktop / В сб.: Информационные технологии в науке, управлении и образовании: междисциплинарный подход и тенденции развития. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Димитровград, 2021. С. 6–11.
  20. *Бухонов Д.О., Сергеева О.О., Говоров П.Ю., Дурманов В.В., Кувайцев А.В., Селиванова С.Е., Белозерова А.Р.* Применение технологии OLAP-кубов для анализа данных // *Вестник Димитровградского инженерно-технологического института.* 2021. № 2(24). С. 48–54.
  21. *Белозерова А.Р., Шиманский Г.А., Белозеров С.В.* Ядерная трансмутация в сталях // *ФММ.* 2009. Т. 107. № 5. С. 528–538.
  22. *Shimansky G.A.* TRANS\_MU computer code for computation of transmutant formation kinetics in advanced structural materials for fusion reactors // *J. Nucl. Mater.* 1999. V. 271–272. P. 30–34.
  23. PREPRO2017. PREPRO – Code System Download. International Atomic Energy Agency - Nuclear Data Section. Vienna International Centre, P.O. Box 100, A-1400 Vienna, Austria – Режим доступа: <https://www.nds.iaea.org/public/endl/prepro2017/>. Дата обращения: 10.02.2022.
  24. International Atomic Energy Agency (<http://www.iaea.org/>), Division of Physical and Chemical Sciences, Nuclear Data Section, A-1400 AUSTRIA, CD ROM Edition, Request 2378.01, FENDL-2, May 1998 Version – Режим доступа: <https://www-nds.iaea.org/fendl20/>. Дата обращения: 10.02.2022.
  25. *Chadwick M.B. et al.* ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology // *Nuclear Data Sheets.* V. 107. Issue 12, December 2006, P. 2931–3060. Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090375206000871>. Дата обращения: 10.02.2022.
  26. *Белозерова А.Р., Щеколдин В.В.* Технология подготовки ядерных данных в формате XML для расчетов ядерной трансмутации // *Вестник Димитровградского инженерно-технологического института.* 2021. № 2(24). С. 41–47.
  27. *Белозерова А.Р., Белозеров С.В., Шамардин В.К.* К вопросу моделирования эффектов ядерной трансмутации при исследовании фазового состава облученных аустенитных сталей // *Физика металлов и металловедение.* 2018. Т. 119. № 5. С. 435–443.
  28. *Белозерова А.Р., Белозеров С.В., Шамардин В.К.* К вопросу моделирования эффектов ядерной трансмутации при исследовании физических свойств циркониевых сплавов // *ФММ.* 2020. Т. 121. № 6. С. 564–575.