

На правах рукописи

Латыпов Руслан Назымович

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ БЕРИЛЛИЯ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ
ДО ВЫСОКОЙ ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ДОЗЫ**

Специальность: 05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2012

Работа выполнена в отделении реакторного материаловедения
ОАО «Государственный научный центр Научно-исследовательский институт
атомных реакторов» (ОАО «ГНЦ НИИАР»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рисованый Владимир Дмитриевич

Официальные оппоненты: Светухин Вячеслав Викторович,
доктор физико-математических наук, профессор,
директор НИТИ ФГБОУ ВПО «УлГУ».

Аверин Сергей Александрович, кандидат
Технических наук, начальник лаборатории
ОАО «ИРМ».

Ведущая организация: ОАО «ВНИИНМ им. А.А.Бочвара»

Защита диссертации состоится «___»_____ 2012 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 в Национальном
исследовательском центре «Курчатовский институт».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский
институт».

Автореферат разослан «___»_____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Мадеев В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Бериллий, благодаря своим уникальным ядерно-физическим свойствам, широко используется в атомной технике. Малое сечение поглощения тепловых нейтронов и высокий коэффициент замедления, удовлетворительные механические характеристики и высокая теплопроводность в исходном состоянии позволяют применять бериллий в качестве замедлителя и отражателя нейтронов активных зон ядерных реакторов [1], а также в качестве blankets первой стенки термоядерных реакторов ИТЭР и DEMO [2].

Актуальность и необходимость проведения исследований бериллия при высоких повреждающих дозах отражена в федеральных целевых программах «Международный термоядерный реактор ИТЭР» на 2002-2005 год и «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 - 2015 годов и на перспективу до 2020 года». В связи с этим проводятся разработки новых марок бериллия и исследования его радиационной стойкости.

Многолетний опыт эксплуатации исследовательских ядерных реакторов СМ и МИР показывает, что основная причина выхода из строя бериллиевых блоков отражателя и замедлителя – образование и последующее распространение трещин с фрагментацией изделий. Растрескивание материала происходит под влиянием термических напряжений, возникающих в блоке в результате радиационного разогрева и наличия неравномерности температурного поля (температурных градиентов) в массиве изделия. Температурные градиенты, из-за которых возникают термические напряжения, напрямую зависят от условий отвода тепла от центра облучаемого блока к его периферии, что, в свою очередь, обусловлено теплопроводностью бериллия. Таким образом, теплопроводность реакторного бериллия является одним из важнейших с практической точки зрения физических свойств материала, изучение которого в дальнейшем позволит прогнозировать увеличение ресурса бериллиевых блоков отражателя и замедлителя исследовательских реакторов, в том числе блоков, изготовленных из новых марок бериллия. Для понимания зависимости процесса изменения теплопроводности от высоких, выше ресурсных $6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, нейтронных повреждающих доз необходимо также исследование радиационно-индуцированных изменений микроструктуры материала.

Цель работы – получение экспериментальных данных по теплопроводности различных марок бериллия, изменению его состава и структуры, после нейтронного облучения при температурах 70, 200 и 400 °С до высоких повреждающих доз и послерадиационных отжигов.

Для достижения поставленной цели решались следующие научно – технические задачи:

- анализ литературных данных по изменению теплопроводности реакторных материалов при облучении в ядерных реакторах;
- облучение образцов перспективных марок бериллия в реакторе СМ при температурах 70 °С и 200 °С до флюенса нейтронов $(0,5-12) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) и в реакторе БОР-60 при температуре 400 °С до флюенса нейтронов $16 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$);
- создание установки и разработка методики исследования температуропроводности облученных образцов бериллия на основе flash-метода;
- получение температурных и дозовых зависимостей теплопроводности бериллия различных марок;
- получение температурных зависимостей теплопроводности бериллия, подвергнутого послереакторному отжигу;
- исследование возможных изменений микроструктуры бериллия после нейтронного облучения и послереакторных отжигов.

На защиту выносятся следующие положения

1. Установка и методика измерения температуропроводности облученных образцов бериллия в диапазоне температур от 20 до 900 °С;
2. Экспериментальные данные по теплопроводности бериллия марок ТВ-56, ТВ-30, ТИП и ДИП, облученного в реакторе СМ при температуре 70 °С в водной среде до значений флюенсов нейтронов $(0,5-12,4) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) в диапазоне температур измерения 20-200 °С;
3. Экспериментальные данные по теплопроводности бериллия марок ТВ-56, ТВ-30, ТИП и ДИП, облученного в реакторе СМ при температуре 200 °С в среде гелия до значений флюенсов нейтронов $(1,4-11,7) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) в диапазоне температур измерения 20-200 °С;
4. Экспериментальные данные по теплопроводности бериллия ТВ-400 облученного в реакторе БОР-60 при температуре 400 °С в среде натрия до флюенса нейтронов $16 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) в диапазоне температур измерения 20-200 °С;

5. Экспериментальные данные по теплопроводности бериллия после облучения при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22}\text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1\text{ МэВ}$) в результате послереакторных отжигов при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Научная новизна

1. Исследована теплопроводность образцов бериллия после облучения до флюенса быстрых нейтронов $1,6 \cdot 10^{23}\text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1\text{ МэВ}$), что более чем в два раза превышает предельно-ресурсные значения по повреждающей дозе для изделий (блоков) исследовательских ядерных реакторов ($0,6 \cdot 10^{23}\text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1\text{ МэВ}$));

2. Выявлены основные закономерности изменения теплопроводности бериллия от повреждающей дозы, температуры облучения и послерадиационных отжигов;

3. Исследовано влияние трансмутационного гелия, накапливаемого в бериллии при высоких повреждающих дозах, на изменение его теплопроводности;

4. Исследовано влияние структурных изменений бериллия после высокодозного нейтронного облучения и после проведения отжигов на его теплопроводность.

Практическая ценность

- полученные результаты экспериментальных исследований теплопроводности облученного бериллия использованы для обоснования работоспособности и продления ресурса бериллиевых блоков отражателя и замедлителя исследовательских реакторов СМ и МИР;

- полученные экспериментальные результаты по теплопроводности реакторного бериллия были использованы при обосновании работоспособности новых марок бериллия и новых крупногабаритных конструкций из бериллия, используемых в реакторе СМ и МИР;

- разработаны установка и методика определения температуропроводности облученных образцов бериллия.

Степень обоснованности научных положений и рекомендаций сформулированных в диссертации

Достоверность полученных научных результатов и выводов подтверждается выполнением исследований на базе отделения реакторного материаловедения ОАО «ГНЦ НИИАР» с использованием

сертифицированных методик, аттестованного оборудования и получением воспроизводимых данных на большом количестве испытаний.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы представлены и обсуждены:

- на 21-м Симпозиуме по термоядерным технологиям, г. Мадрид, Испания, 2000 г.;
- на 6-ой Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, Россия, 2000 г.;
- на 5-ой Рабочей группе Международного Энергетического Агентства по бериллию, г. Москва, Россия, 2001 г.;
- на 10-ой Международной конференции по материалам ТЯР (ICFRM-10), г. Баден-Баден, Германия, 2001 г.;
- на 7-ой Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, Россия, 2003 г.;
- на 6-ой Рабочей группе Международного Энергетического Агентства по бериллию, г. Миязаки, Япония, 2003 г.
- на 7-ой Рабочей группе Международного Энергетического Агентства по бериллию, г. Санта-Барбара, США, 2005 г.
- на 8-ой Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, Россия, 2007 г.;
- на 8-ой Рабочей группе Международного Энергетического Агентства по бериллию, г. Лиссабон, Португалия, 2007 г.

В диссертационную работу включены результаты исследований, опубликованные в 16 печатных работах в отечественных и иностранных журналах, сборниках и тезисах докладов различных конференций, в том числе, 7 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК.

Личный вклад автора. Соискатель являлся ответственным исполнителем всех основных проведенных в ОАО «ГНЦ НИИАР» работ по исследованию теплопроводности реакторного бериллия. Им лично разработана методика измерения и получены все экспериментальные результаты, приводимые в диссертации. Личный вклад Латыпова Р.Н. в получение результатов работы, представляемой к защите, является определяющим.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав с обсуждением исследований, выводов и списка литературы.

Работа содержит 95 страниц, 31 рисунок, 9 таблиц и 56 наименований в списке литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы, изложены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературы по методам исследования теплопроводности, по влиянию нейтронного облучения на теплопроводность реакторного бериллия, а также особенностям радиационного дефектообразования бериллия.

Литературный анализ показал, что для определения теплопроводности облученных материалов возможно применение стандартных общеизвестных методов. При этом предпочтительнее использовать один и тот же метод измерения для материалов до и после реакторного облучения, чтобы исключить влияние погрешности метода [3]. Также было выяснено, что наиболее перспективным методом измерения теплопроводности является импульсный метод, который обеспечивает прямое, быстрое и точное определение термофизических свойств материала.

Анализ представленных в литературе экспериментальных данных по изменению теплопроводности выявил крайне малое количество экспериментальных результатов по теплопроводности металлического бериллия, подвергшегося облучению.

В результате анализа литературных данных сделаны следующие выводы:

1. Наиболее целесообразно использовать установки для измерения теплопроводности облученных материалов на основе импульсного метода.
2. Отсутствуют данные об изменении теплопроводности бериллия при высоких повреждающих дозах облучения.
3. Отсутствуют данные о влиянии температуры облучения на изменение теплопроводности бериллия.
4. Недостаточно информации о радиационно-индуцированном изменении теплопроводности бериллия различных марок, полученных по различным технологиям.

5. Отсутствуют данные о влиянии послереакторных отжигов на восстановление теплопроводности реакторного бериллия.

Во второй главе представлены исследуемые материалы, описаны методики реакторных испытаний и послереакторных исследований.

Было исследовано пять марок бериллия российского производства, разработанных в ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара: ТВ-56, ТВ-30, ТВ-400, ТИП и ДИП, отличающихся технологией изготовления. Бериллий марок ТВ-56 и ТВ-30 был изготовлен по технологии горячего экструдирования (выдавливания), бериллий марки ТВ-400 – по технологии горячего прессования, а бериллий марок ТИП и ДИП – по технологии горячего изостатического прессования (см. Таблицу 1).

Таблица 1.

Технология изготовления, плотность и средний размер зерна бериллия.

Марка бериллия	Технология изготовления	Плотность, кг/м ³	Средний размер зерна, мкм
1	2	3	4
ТВ-56	горячее выдавливание	1856	25
ТВ-30	горячее выдавливание	1858	15
ТИП	горячее изостатическое прессование	1861	12
ДИП	горячее изостатическое прессование	1860	13
ТВ-400	горячее прессование	1858	200

Все исследованные марки бериллия, за исключением бериллия марки ДИП, имели техническую чистоту материала (см. Таблицу 2).

Таблица 2.

Химический состав бериллия исследованных марок.

Марка	Элементный состав, % массы												
	Be	BeO	O	C	Si	B	Al	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	Mg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ТВ-56	98,6	1,48	0,98	0,08	0,016	<0,0009	0,026	0,17	0,041	0,04	0,04	0,04	0,04
ТВ-30	98,13	2,5	1,66	0,088	0,013	<0,0009	0,015	0,11	0,028	0,004	0,015	0,004	0,002
ТИП	98,82	1,3	0,89	0,07	0,013	<0,0001	0,013	0,13	0,031	0,0064	0,015	0,004	0,0066
ДИП	98,6	2,0	1,3	0,067	0,013	<0,0001	0,005	0,028	0,0084	0,0029	0,0045	0,0032	0,0016
ТВ-400	92,5	Н/д	Н/д	Н/д	0,06	0,03	0,01	0,16	0,01	0,02	0,001	0,001	0,0003

Образцы, на которых изучалась теплопроводность исследованных марок реакторного бериллия, представляли собой диски диаметром 6 мм,

толщиной 3-3,5 мм. Образцы-диски необлученного материала вырезали из прутков соответствующей марки бериллия.

Образцы для исследования теплопроводности бериллия марок ТВ-56, ТВ-30, ТИП и ДИП в облученном состоянии вырезали из стандартных облученных образцов для механических испытаний: на растяжение в виде цилиндрических гантелей с рабочей частью $\text{Ø} 3 \times 15$ мм, на сжатие – цилиндрические образцы $\text{Ø} 6 \times 8$ мм (рис. 1.а, б).

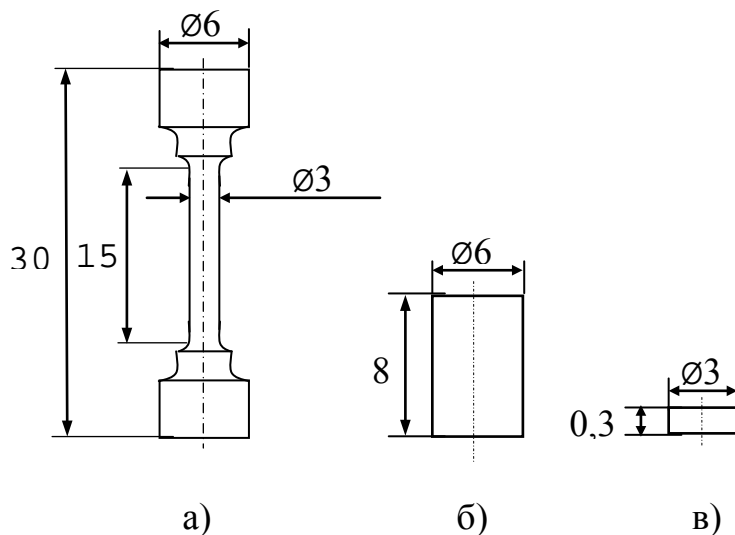


Рис. 1. Исходные бериллиевые образцы для исследований: а) на растяжение; б) на сжатие; в) для ТЭМ-исследований.

Теплопроводность образцов анизотропных марок ТВ-56 и ТВ-30 исследовали только в направлении вдоль оси выдавливания. Для ТЭМ исследований использовали образцы – диски $\text{Ø} 3 \times 0,3$ мм (рис. 1.в).

Образцы бериллия ТВ-400 были изготовлены из бериллиевого вкладыша фотонейтронного источника, который облучался в реакторе БОР-60 при температуре 400°C до флюенса нейтронов $16 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1$ МэВ) (рис. 2).

Облучение образцов бериллия ТВ-56, ТВ-30, ТИП и ДИП проводили в специально разработанных облучательных устройствах-ампулах двух типов – перфорированных, в среде водяного теплоносителя первого контура реактора СМ и герметичных, в среде гелия (рис. 3). Ампулы при облучении размещались в каналах активной зоны реактора СМ. Температура образцов составляла 70°C в перфорированных ампулах, 200°C – в герметичных и была получена расчетным путем. Образцы облучались в диапазоне флюенса нейтронов от $0,3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ до $18 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1$ МэВ) (Таблица 3).

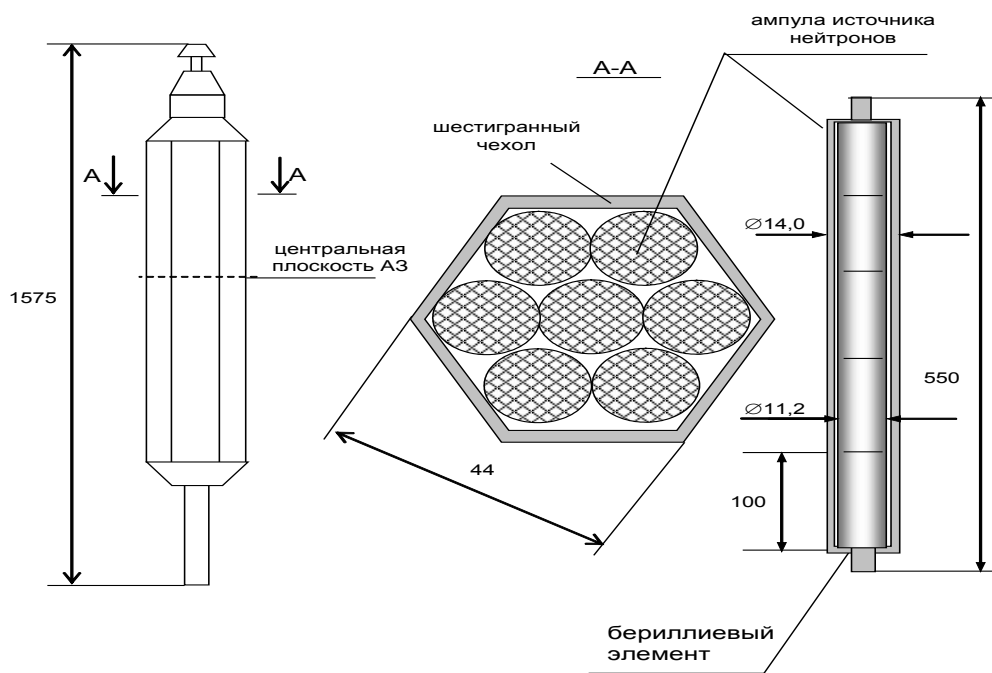


Рис. 2. Фотонейтронный источник реактора БОР-60.

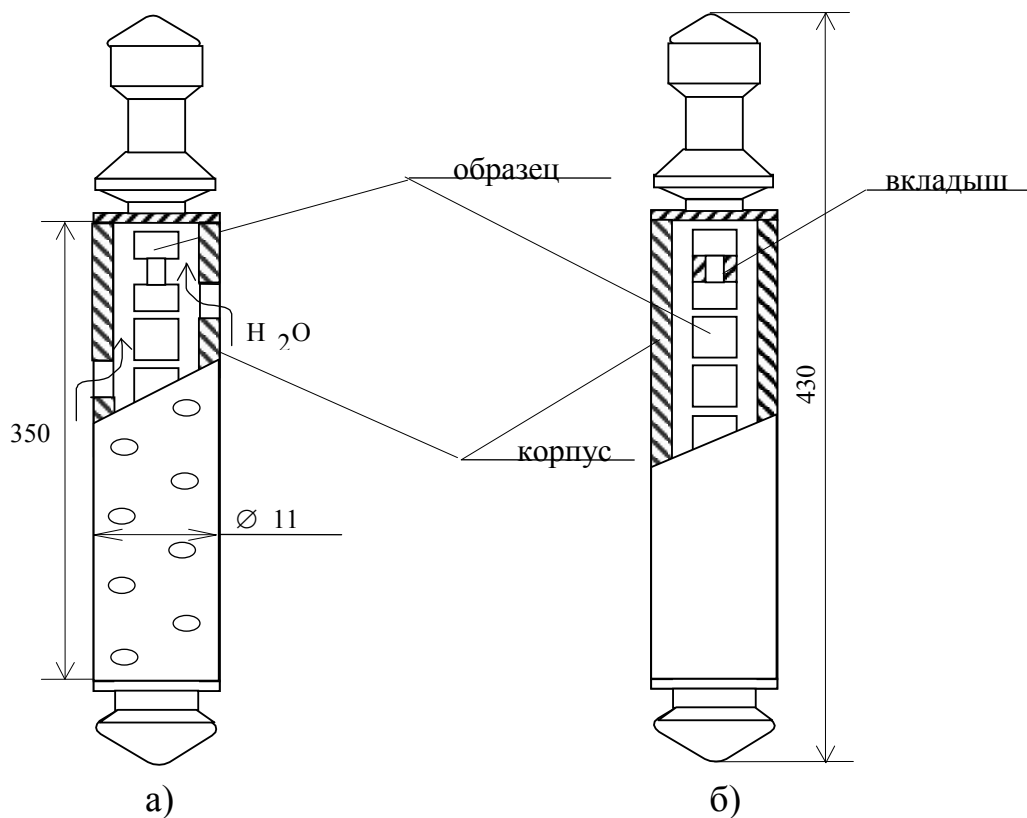


Рис. 3. Ампулы с образцами из бериллия для облучения в канале активной зоны реактора СМ: а) проточная ампула; б) герметичная ампула.

Таблица 3.

Параметры облучения образцов бериллия в реакторе СМ.

Ампула	Марка бериллия	Т _{обл.} , °С (*)	Среда облучения	Флюенс нейтронов F, $\times 10^{22}$ см ⁻²		Повреждающая доза D, сна	
				E>0	E>0,1 МэВ		
Б-1	ТВ-56	70	вода	0,5-1,2	0,3-0,6	1,4-3	
Б-2				11,5-28,3	5,8-14,3	27-67	
Б-3				5,4-12,3	2,7-6,3	13-30	
Б-4				3,5-7,4	1,8-3,8	9-18	
Б-5				1,9-4,7	1,0-2,4	5-11	
Б-6				0,9-1,9	0,5-1,0	2,4-5	
Б-7				7,6-18,7	3,8-9,5	18-45	
Б-8	ТВ-30				1,4-4,2	0,6-2,3	2,8-11
Б-9	ТИП-30				1,3-3,6	0,6-1,9	2,8-9
Б-10	ДИП-30				9,4-23,2	4,7-11,7	22-55
Б-11					14,5-35,6	7,3-18,0	34-85
Б-12	ТВ-30			6,9-17,0	3,5-8,6	16-40	
БТ-1	ТВ-56	200	гелий	1,4-2,8	0,7-1,4	3,3-7	
БТ-2	ТВ-30			1,4-2,8	0,7-1,4	3,3-7	
БТ-3	ТИП-30 ДИП-30			1,4-2,8	0,7-1,4	3,3-7	
БТ-5	ТВ-56			10,5-25,8	5,3-13,1	25-62	
БТ-6	ТВ-30			10,5-25,8	5,3-13,1	25-62	
БТ-7	ТИП-30 ДИП-30			10,5-25,8	5,3-13,1	25-62	

После облучения в реакторе СМ часть образцов была подвергнута отжигу в инертной среде (аргон) при температуре 500 ± 5 °С в течение 3 часов для установления влияния послереакторного отжига на теплопроводность реакторного бериллия. Также часть образцов, облученных в реакторе СМ, подвергали промежуточному отжигу при температуре 500 ± 5 °С в течение 3 часов с последующим продолжением облучения.

Материаловедческие исследования облученных образцов включали: измерения размеров образцов, плотности, коэффициента температуропроводности. При исследованиях использовали стандартные методики и метрологически аттестованные установки.

Значение плотности определялось методом гидростатического взвешивания на установке специальной автоматической для определения плотности «УВА–100пл».

Анализ микроструктуры исследуемых марок бериллия до и после облучения в реакторе проводился с использованием двух методов:

трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ) и оптической микроскопии (металлографии).

В третьей главе представлены методика исследования теплопроводности облученных образцов бериллия, а также конструкция разработанной и изготовленной измерительной установки.

Для выполнения измерений температуропроводности образцов бериллия в ОАО «ГНЦ НИИАР» была разработана методика испытаний реакторных материалов «Определение температуропроводности компактных образцов импульсным методом» [Методика испытаний № 518 по реестру ОАО «ГНЦ НИИАР» 2000 г.] и изготовлена установка.

В качестве источника излучения для нагрева образца в установке было принято решение использовать импульсную ксеноновую лампу-вспышку, а не импульсный лазер, как в других аналогичных устройствах, *в связи со следующими преимуществами* использования импульсной лампы перед лазером:

- *Излучение некогерентное*, поэтому оно не образует переменных гигантских электрических полей, следовательно, при той же поглощаемой образцом энергии за один импульс, распыление поверхностных слоев образца меньше на несколько порядков, по сравнению с лазером. Таким образом, *скорость загрязнения установки радиоактивными изотопами более медленная.*
- *Упрощенная оптическая система* и уход от необходимости заводить луч лазера в камеру или бокс, при исследовании облученных материалов.
- *Стоимость* лампы в сотни раз *ниже*, чем у необходимого лазера.

Методика позволяет определять величину коэффициента температуропроводности в пределах $(0,2-70) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ в интервале температур $(20-900) \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Согласно проведенной метрологической аттестации, доверительные границы относительной погрешности измерения температуропроводности в диапазоне $(0,2-70) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при числе результатов наблюдений $n = 5$, доверительной вероятности $P = 0,95$ и температуре образца $20-900 \text{ }^\circ\text{C}$ не превышает $\pm 5 \%$ [Свидетельство о метрологической аттестации № 167-00].

Схема установки измерения температуропроводности представлена на рис. 4.

Основное устройство имеет вид представленный на схеме (рис. 5).

Сущность импульсного метода измерения температуропроводности заключалась в том [4-5], что короткий, длительностью порядка 1,3 мс, высокоинтенсивный световой импульс направлялся на фронтальную поверхность плоского образца, а температурный отклик обратной поверхности образца регистрировался термоэлектрическим преобразователем.

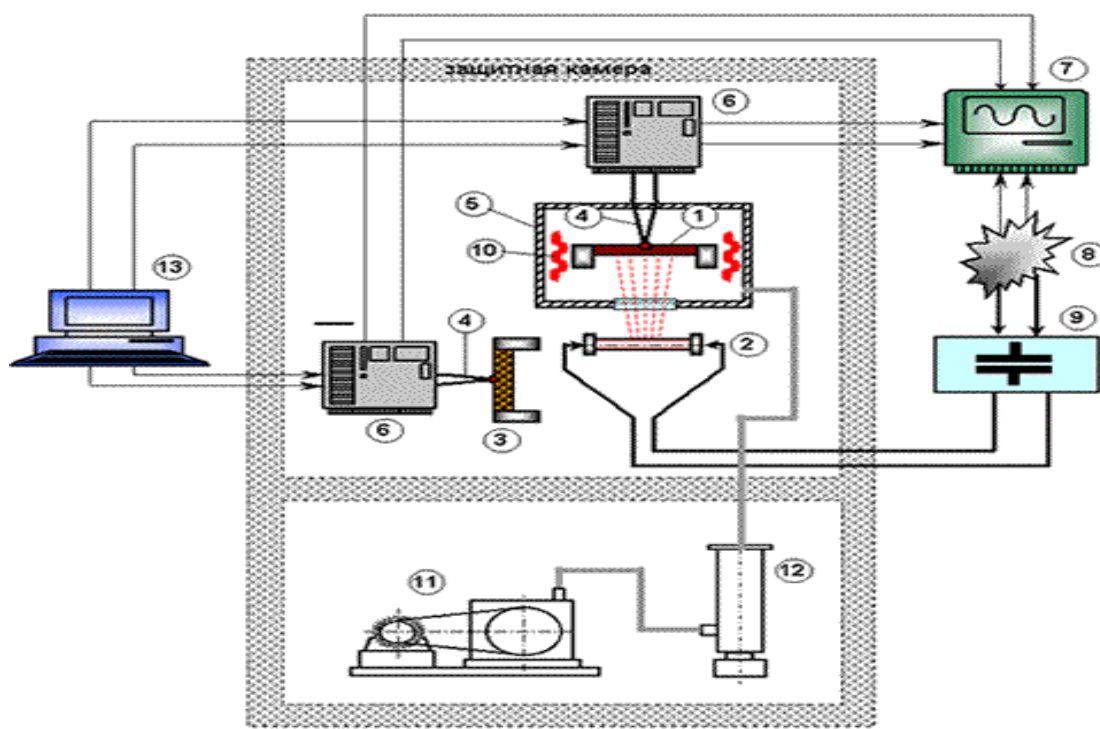


Рис. 4. Схема установки измерения температуропроводности
 1 - образец; 2 - импульсная лампа; 3 - эталонный образец; 4 - термопары; 5 - вакуумная камера; 6 - усилитель постоянного тока; 7 - осциллограф; 8 - зарядное устройство; 9 - конденсаторы; 10 - нагреватель; 11 - форвакуумный насос; 12 - диффузионный насос; 13 - блок управления, компенсации и эталонного сигнала

Температурный отклик усиливался и передавался на экран цифрового запоминающего осциллографа и в персональный компьютер. Зарегистрированный сигнал численно обрабатывался для получения показания времени нагрева образца до половины максимальной температуры.

Коэффициент температуропроводности определялся по форме кривой температурного отклика [6] методом Паркера.

Максимальная температура нагрева образца за один световой импульс достигала 0,5-3 °С, и определялась оптическими свойствами, теплоемкостью и высотой образца. При условии, что длительность нагревающего импульса

была во много раз меньше длительности регистрируемого температурного отклика, половина времени максимального нагрева обратной стороны образца не зависела от оптических свойств изучаемого материала и энергии вспышки лампы. Это свойство метода позволяло проводить измерения температуропроводности практически всех материалов, из которых возможно изготовить плоский образец необходимого диаметра и толщины, в том числе бериллия.

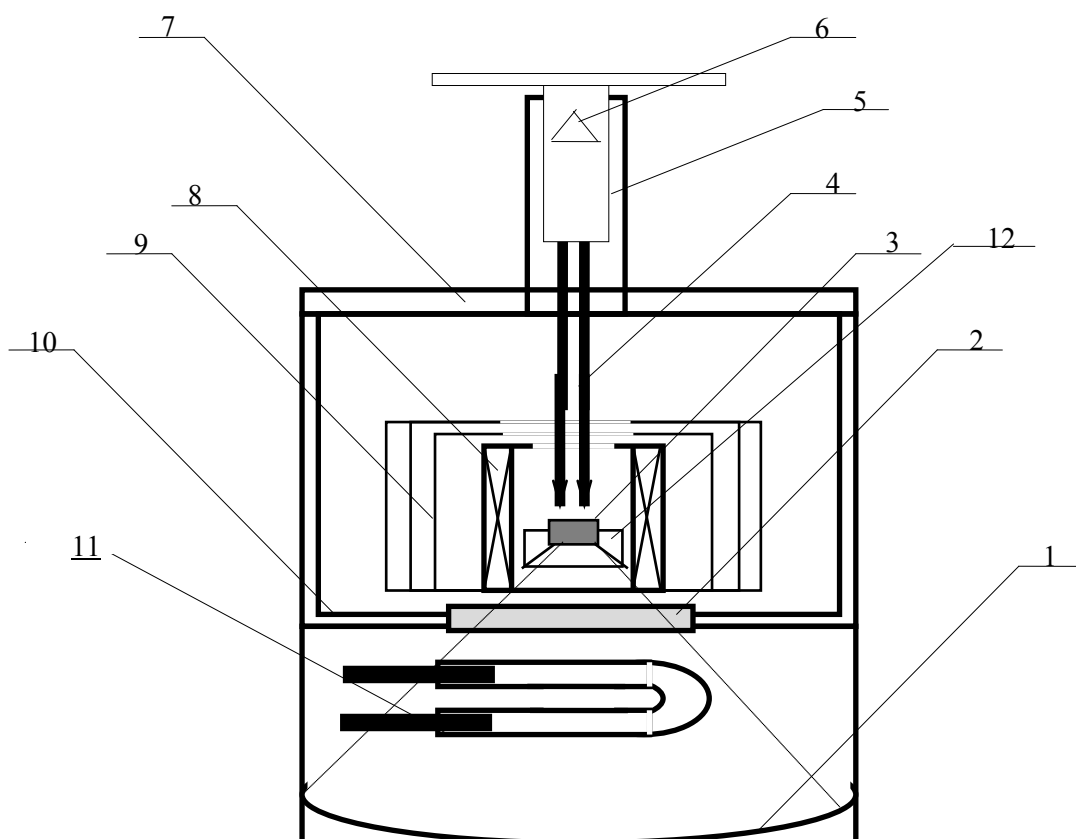


Рис. 5. Схема импульсной установки измерения температуропроводности: 1 - рефлектор, 2 - кварцевое окно, 3 - образец, 4 - термоэлектрический преобразователь, 5 - прижимное устройство, 6 - первый каскад усилителя, 7 - крышка с водяным охлаждением, 8 - нагреватель, 9 - экраны, 10 - корпус с водяной рубашкой, 11 - импульсная лампа, 12 - держатель образца.

Источником излучения и нагрева является ксеноновая импульсная лампа. Энергия вспышки лампы — до 6500 Дж, длительность вспышки не превышает 1,3 мс.

Полезный сигнал должен был иметь вид классической кривой Паркера, но накладывающийся шум, не позволял определять температуропроводность с достаточной точностью.

Для того чтобы выделить полезный сигнал был проведен анализ всего спектра шумов и приняты решения для их уменьшения [7]. Шум условно был разделен на три составляющие: белый высокочастотный шум, синфазный шум и вредный сигнал, наведенный во время разрядки батареи конденсаторов. Принятые в работе решения позволили значительно снизить влияние шума на точность измерений.

В целях снижения «разрядной» наводки в НИИ «ЗЕНИТ» была изготовлена специальная лампа. В разработанной лампе-вспышке обеспечивалась симметричность токовых потоков при минимальной индуктивности контура, что позволяло значительно уменьшить наводки в регистрирующем контуре в первые миллисекунды после вспышки.

Разработанная совместно с НИИ «ЗЕНИТ» лампа состоит из двух независимо наполненных ксеноном частей в форме трубок (рис. 6). Два потока электрических заряженных частиц равны друг другу во времени и центрально симметричны относительно одной и той же оси, однако направлены в противоположные стороны, что и обеспечивает минимум наводок.

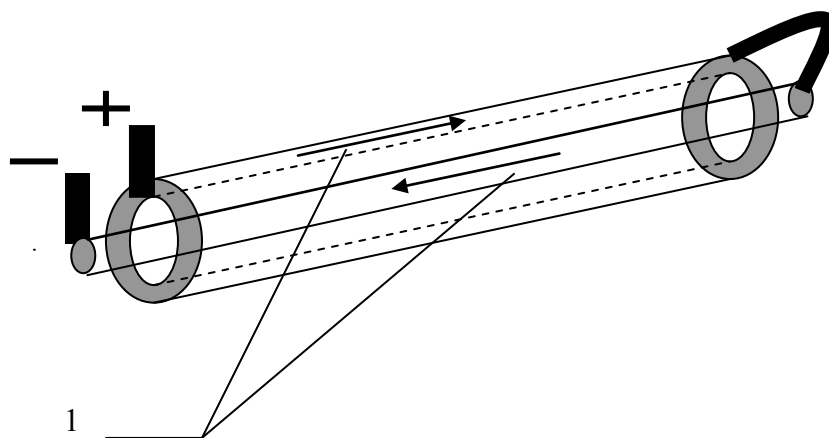


Рис. 6. Схема специальной лампы-вспышки: 1 – осе-симметричные потоки заряженных частиц в момент разрядки

Разработанная при выполнении данной диссертационной работы установка имела **ряд преимуществ**:

1. **Использование лампы-вспышки меньшей мощности сделало установку более компактной**, что очень важно при проведении работ в условиях радиационно-защитного бокса;
2. **Использование лампы-вспышки меньшей мощности** приводило к меньшему распылению поверхностных слоев образца. **Таким образом, загрязнение установки радиоактивными изотопами было меньше.**

3. *Применение усилителя с коэффициентом усиления $5 \cdot 10^3$, при чувствительности не менее 1 мкВ, и системы шумоподавления* позволило *снизить погрешность* измерения при постоянной толщине образца, а также *проводить*, при необходимости, *измерения* достаточно толстых, до 5 мм толщиной, образцов *без потери амплитуды сигнала*;

4. *Разработка специальной лампы-вспышки*, которая допускает производить исследование тонких образцов, позволяет загружать в реактор на облучение образцы меньшего размера, что при исследовании облученных материалов *снижает дозовую нагрузку на персонал*, выполняющий измерения.

Значение теплопроводности исследованных образцов реакторного бериллия всех указанных марок определялось расчетным путем с учетом величин их температуропроводности, теплоемкости и плотности, полученных экспериментально, либо принятых из литературных данных.

Для расчета теплопроводности использовали литературные данные по теплоемкости бериллия.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты исследования теплопроводности образцов бериллия.

При сопоставлении марок видно, что большая теплопроводность реакторного бериллия ТВ-56 в исходном состоянии по сравнению с бериллием ТВ-30 коррелирует с большим средним размером зерна и меньшим количеством вредных примесей первого, при идентичности текстуры материалов, которая определяется технологией изготовления. Для бериллия марок ТИП и ДИП, при приблизительном равенстве среднего размера зерна, различную теплопроводность можно объяснить различным количеством примесей, при идентичности текстуры. Бериллий марки ТВ-400, несмотря на относительно большой средний размер зерна, значительно уступает в теплопроводности всем вышеуказанным маркам из-за низкой чистоты материала (рис. 7).

Зависимость теплопроводности облученного бериллия марки ТВ-56 от температуры в интервале температур от 20 до 200 °С, как и необлученного, остается линейной (рис. 8).

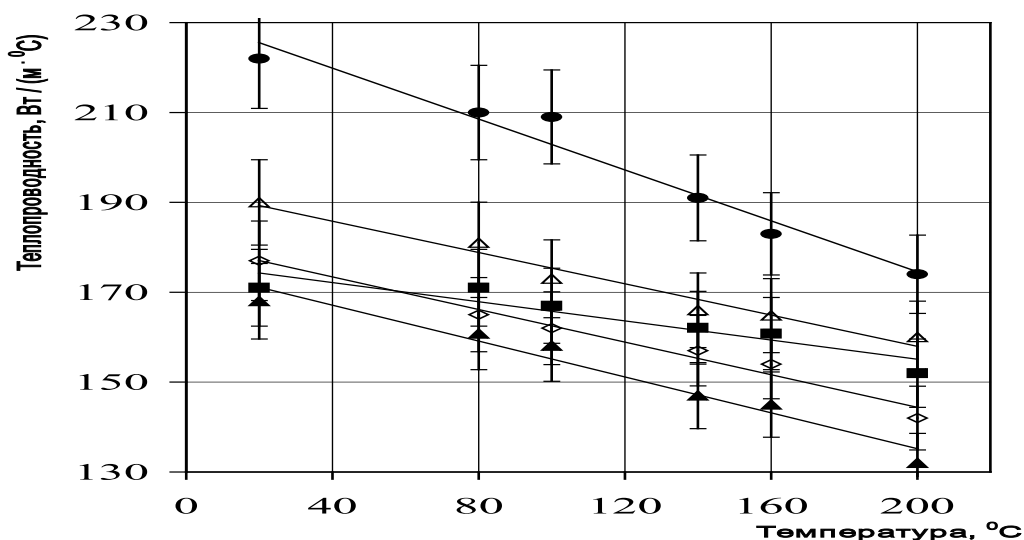


Рис. 7. Температурная зависимость теплопроводности бериллия в исходном состоянии: ТВ-56 (●); ТВ-30 (◇); ТВ-400 (▲); ТИП (■); ДИП (△).

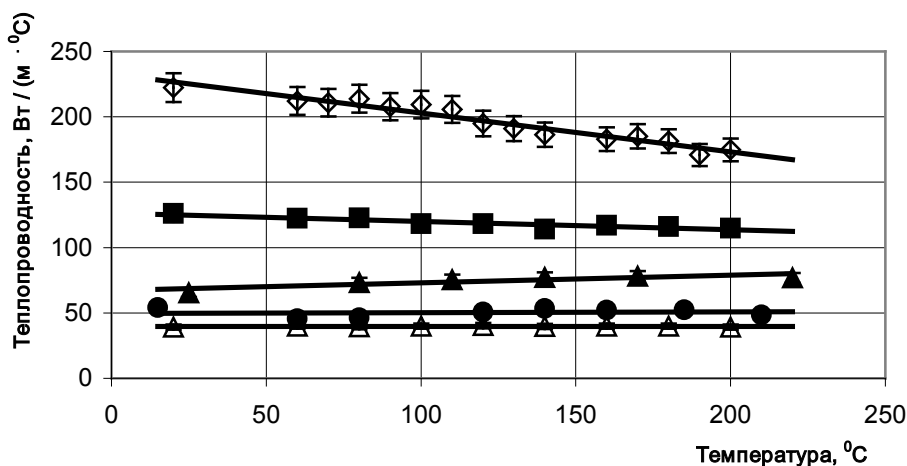


Рис. 8. Температурная зависимость теплопроводности бериллия ТВ-56 в исходном состоянии (◇) и облученного (70 °С) до значений флюенса нейтронов $\times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1$ МэВ): 0,5 (■); 1,0 (▲); 2,0 (●); 11,4 (△).

Нейтронное облучение при температуре 70 °С до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1$ МэВ) приводит к резкому снижению теплопроводности бериллия этой марки. Так, при температуре испытаний 80 °С значение теплопроводности упало с 210 до 46 Вт/м·°С, то есть почти в пять раз. При этом практически исчезает имевшая место в исходном необлученном состоянии зависимость теплопроводности бериллия от температуры испытаний, то есть фактически величина теплопроводности в интервале температур от комнатной до 200 °С остается в процессе измерений примерно на одном уровне. При последующем увеличении нейтронной дозы облучения

вплоть до величины флюенса $11,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) дальнейшего снижения теплопроводности не происходит, и она остается в области 40-50 Вт/м·°С (рис. 9).

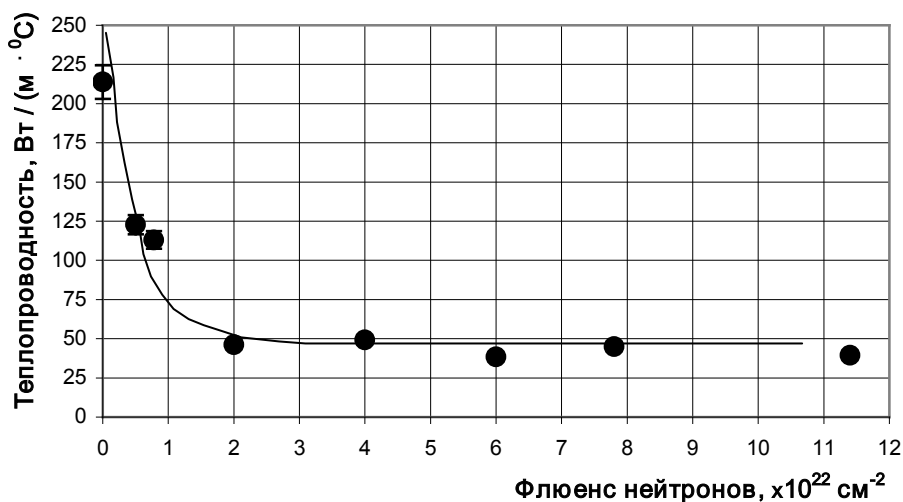


Рис. 9. Дозная зависимость теплопроводности бериллия ТВ-56, облученного при температуре $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в реакторе СМ ($T_{\text{измер.}} - 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Также представлены результаты исследования теплопроводности образцов бериллия марок ТВ-30, ТИП и ДИП в исходном состоянии и после облучения в реакторе СМ при температуре $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до значений флюенса нейтронов от $1,19$ до $11,69 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$). Теплопроводность бериллия ТВ-30 при облучении до значений флюенса нейтронов $4,57 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) снижается несколько меньше, по сравнению с бериллием ТВ-56, до $70 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ и остается практически постоянной на всем интервале измерений от 20 до $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплопроводность бериллия марки ТИП при облучении до значений флюенса нейтронов $1,68 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и $11,69 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) снижается до тех же уровней, что и теплопроводность бериллия ТВ-56, и остается при значениях $100 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ и $45-50 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$, соответственно. Теплопроводность бериллия марки ДИП, имеющего несколько более высокую по сравнению с маркой ТИП, исходную теплопроводность, при облучении до значения флюенса нейтронов $11,66 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) снижается до $40-45 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$.

При облучении бериллия ТВ-56 теплопроводность образцов, облученных при температуре $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, снижается значительно больше, на $30-90 \%$, по сравнению с образцами, облученными при температуре $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Данная закономерность сохраняется и для образцов бериллия марок ТВ-30, ТИП и ДИП.

Температурные зависимости теплопроводности бериллия марок ТВ-56 и ТВ-400 в исходном состоянии, и после облучения в реакторах СМ и БОР-60 при температурах 70 и 400 °С соответственно хорошо отражают зависимость величины падения теплопроводности бериллия при облучении от температуры облучения материала (рис. 10).

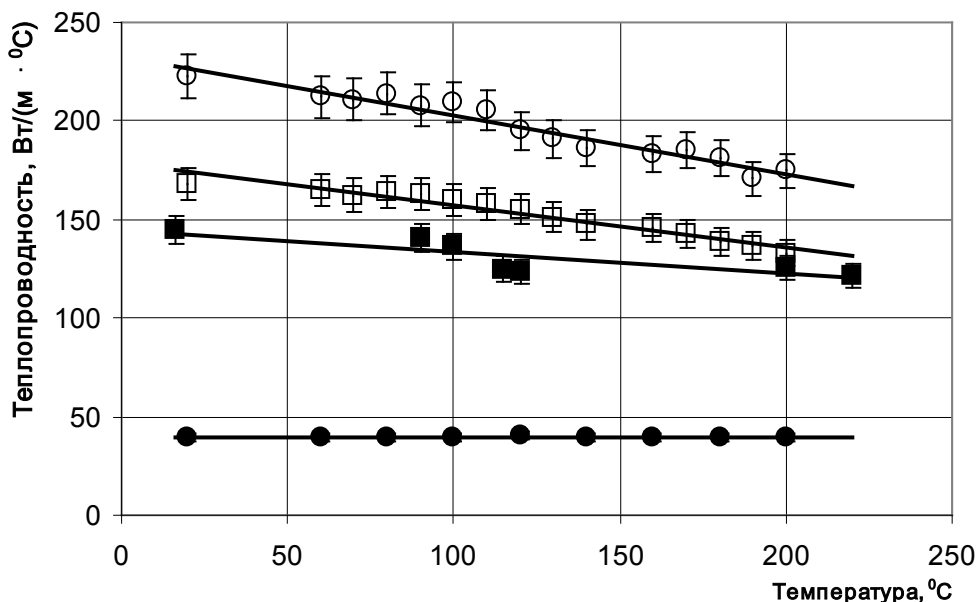


Рис. 10. Температурная зависимость теплопроводности бериллия в исходном состоянии – ТВ-56 (○), ТВ-400 (□), и облученного в реакторе СМ-3 бериллия ТВ-56 (●) при 70 °С до флюенса $12,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) и в реакторе БОР-60 бериллия ТВ-400 (■) при 400 °С до флюенса $16 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$).

В исходном состоянии бериллий марки ТВ-400, как отмечалось выше, имеет наименьшую из исследованных марок теплопроводность, однако высокодозное облучение в реакторе БОР-60 при температуре 400 °С приводит к её снижению лишь примерно на 15 %, в то время как аналогичная, даже несколько меньшая по величине, доза облучения бериллия марки ТВ-56 в реакторе СМ при 70 °С ведет к падению теплопроводности более чем в четыре раза. Наличие резкой обратной зависимости эффекта снижения теплопроводности бериллия от температуры облучения в области 70-400 °С сомнения не вызывает.

Содержание гелия, образовавшегося в результате ядерных реакций, прямо пропорционально флюенсу нейтронов, набранному материалом при облучении в реакторе [8]. Сопоставление зависимостей содержания гелия и

теплопроводности от флюенса показывает, что увеличение содержания гелия с 4000 аррт при флюенсе нейтронов $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ до более 10000 аррт при флюенсе нейтронов $6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (рис. 11) не приводит к изменению значений теплопроводности (рис. 9).

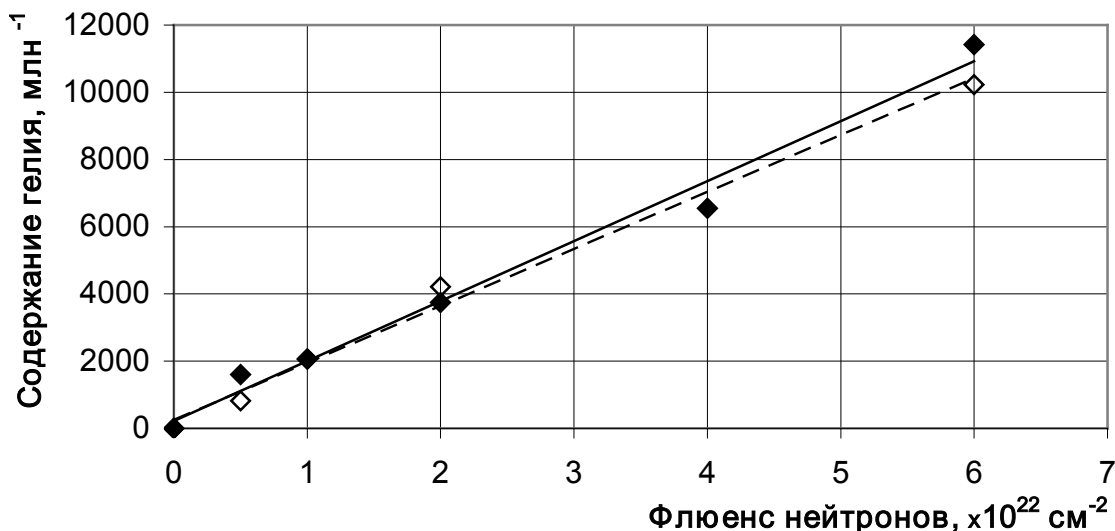


Рис. 11. Зависимость содержания ^4He , образовавшегося в бериллии ТВ-56, от флюенса нейтронов: расчетная (\diamond) и экспериментальная (\blacklozenge)[8].

Таким образом, зависимость теплопроводности бериллия от трансмутационного гелия, накопленного при облучении в реакторе, несмотря на его значительное количество ясно не просматривается.

Отжиг при температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 часов, образцов бериллия ТВ-56, облученных в реакторе СМ при температуре $70 \text{ }^\circ\text{C}$ до значения флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, приводит к частичному восстановлению значения теплопроводности данных образцов. Теплопроводность вырастает с $45\text{-}50 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ до почти $117 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$. При этом следует отметить, что повторное облучение отожженных образцов в реакторе СМ при температуре $70 \text{ }^\circ\text{C}$ до значения флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, приводит к падению теплопроводности до прежнего уровня в $45\text{-}50 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$, идентичного уровню теплопроводности образцов, облученных до флюенса нейтронов $\sim 4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ в непрерывном режиме (рис. 12).

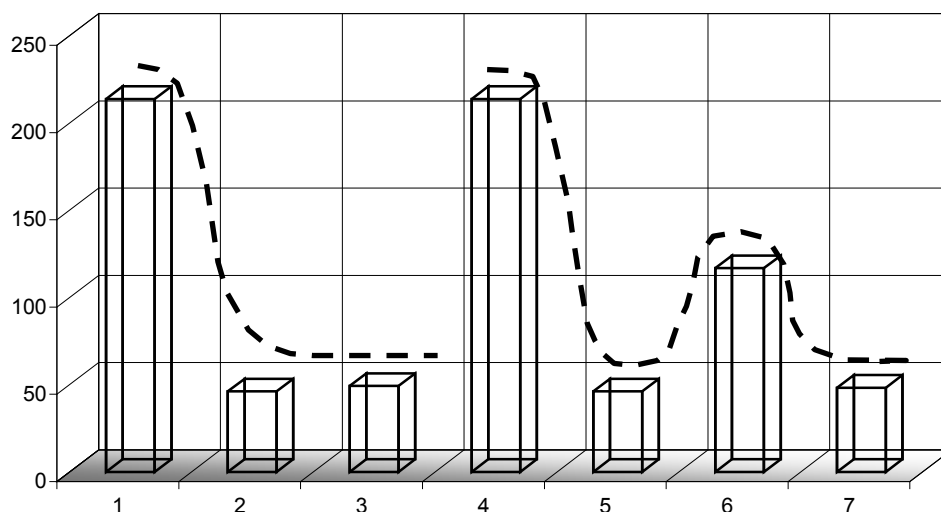


Рис. 12. Теплопроводность бериллия ТВ-56, облученного и отожженного: 1, 4 - исходный; 2, 5 - облученный при 70°C до $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$; 3 - облученный при 70°C до $3,66 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$; 6 - облученный при 70°C до $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и отожженный при 500°C в течение 3 ч.; 7 - облученный при 70°C до $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, отожженный при 500°C в течение 3 ч. и повторно облученный при 70°C до $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$.

Исследования микроструктуры бериллия ТВ-56 методом ТЭМ показали, что в состоянии после облучения основными радиационными дефектами являются дислокационные петли высокой объемной плотности (рис. 13.а) при низких температурах облучения, а также поры (рис. 13.д, е) при высоких температурах (400°C) облучения.

Исследования теплопроводности при этом показали, что зависимость ее изменения от количества трансмутационного гелия, накопленного при облучении, независимо от характера и размера образований, в которых гелий находится, не установлена.

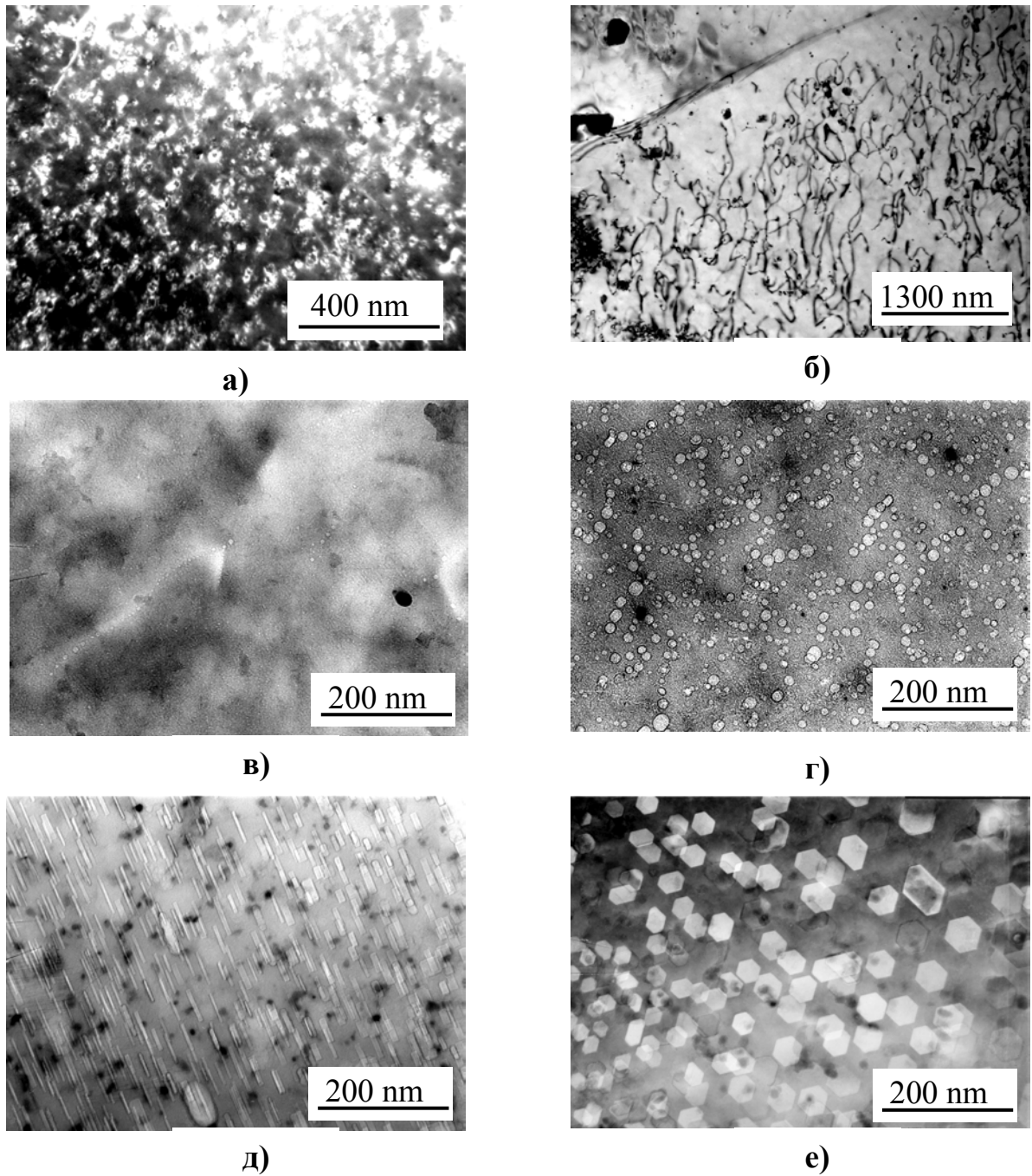


Рис. 13. Влияние облучения и отжига на микроструктуру бериллия:
 а) ТВ-56 – $T_{\text{обл}} = 70^{\circ}\text{C}$, $F = 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$);
 б) ТВ-56 – $T_{\text{обл}} = 70^{\circ}\text{C}$, $F = 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) + отжиг 500°C , 1 час;
 в) ТВ-56 – $T_{\text{обл}} = 70^{\circ}\text{C}$, $F = 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) + отжиг 500°C , 1 час;
 г) ТВ-56 – $T_{\text{обл}} = 70^{\circ}\text{C}$, $F = 2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) + отжиг 700°C , 1 час;
 д, е) ТВ-400 – $T_{\text{обл}} = 400^{\circ}\text{C}$, $F = 16 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$).

С ростом дозы облучения в металлах, как правило, наблюдается тенденция увеличения объемной плотности петель [9] с выходом ее на насыщение при повреждающих дозах выше $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) [10].

Опираясь на полученные результаты исследований теплопроводности бериллия, облученного до различных повреждающих доз вплоть до флюенса нейтронов $12 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$), можно предположить, что такое насыщение наступает при флюенсе нейтронов равном приблизительно $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$), после которого значение теплопроводности бериллия практически не изменяется.

К сожалению, высокая хрупкость облученных образцов-дисков не позволила провести ТЭМ-исследования бериллия после высокодозного нейтронного облучения и построить дозную зависимость плотности образовавшихся дислокационных петель, однако подвергать сомнению положения работ [9, 10] оснований нет.

Кратковременный отжиг при температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ облученного бериллия марки ТВ-56 приводит, во-первых, к эволюции дислокационных петель в дислокационную сетку (рис. 13.б), во-вторых, к появлению первых разрешимых методом ТЭМ гелиевых пузырьков (рис. 13.в), которые при дальнейшем росте температуры отжига до $700 \text{ }^\circ\text{C}$ значительно увеличиваются в размерах (что сопровождается снижением их объемной плотности) (рис. 13.г). При этом данные микроструктурные изменения вызывают, как было показано выше, довольно существенное по величине восстановление значений теплопроводности.

Высокодозное облучение при $400 \text{ }^\circ\text{C}$ бериллия марки ТВ-400 приводит к образованию газо-вакансионных пор плоской формы, которые залегают лишь по определенным кристаллографическим плоскостям (рис. 13.д и 13.е).

Именно эта структура имеет следствием сравнительно невысокий по величине эффект снижения теплопроводности облученного в данных условиях бериллия ТВ-400. Вероятно, подобные, достаточно крупные структурные образования, такие как гелиевые пузырьки или поры, а также дислокационная сетка не обладают высокой эффективностью как центры рассеяния электронов проводимости.

В **пятой главе** рассмотрены два основных пути увеличения срока службы бериллиевых блоков, которые обоснованы с применением результатов данной работы:

1. Разделение блока на составные части (составной блок) с целью снижения термических и других внутренних напряжений и появления возможности периодической замены более повреждаемой центральной части блока [11].

2. Использование промежуточного отжига блока до достижения ресурсного флюенса для релаксации накопившихся внутренних напряжений при низкотемпературном облучении путем перераспределения скоплений радиогенного гелия [12].

Пределы температуры промежуточного отжига ограничены процессами газового распухания и миграции радиогенного гелия к границам зерен. Их активация может привести к еще большей хрупкости бериллия. Проведенные сравнительные исследования теплопроводности образцов бериллия марки ТВ-56, облученных при температуре 70 °С до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ), затем отоженных в вакууме при температуре 500 °С в течение 3-х часов и снова облученных до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ) и образцов, облученных непрерывно до флюенса нейтронов $4 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ) говорят о положительном влиянии промежуточного отжига. Однако реализация данного варианта с технической точки зрения может оказаться сложной и финансово затратной.

Поэтому, предложено усовершенствовать существующую конструкцию бериллиевого блока таким образом, чтобы увеличить его рабочую температуру, а также снять с самого блока роль несущей конструкции. Это достигается путем заключения его в герметичный чехол из прозрачного для нейтронов конструкционного материала, например, алюминия или циркония [13].

На каждый из вариантов увеличения срока службы получены патенты Российской Федерации. Следующим этапом является разработка конструкции и изготовление экспериментальных бериллиевых блоков с последующим испытанием в реакторе СМ. В случае внедрения новой конструкции бериллиевых блоков может быть достигнуто увеличение ресурса с существующего сегодня уровня $6 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ) в два-три раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана, изготовлена и аттестована установка и методика измерения температуропроводности плоских образцов диаметром от 4 до 10 мм и высотой от 1 до 5 мм на базе ксеноновой лампы-вспышки с энергией 6500 Дж и операционного усилителя с коэффициентом усиления $5 \cdot 10^3$, при чувствительности не менее 1 мкВ. Доверительные границы относительной погрешности измерения температуропроводности в диапазоне от 0,2 до 70

мм²/с при доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе результатов наблюдений $n = 5$ и температуре образца в диапазоне 20 – 900 °С составляет $\pm (1 - 5) \%$;

2. Нейтронное облучение бериллия при температуре 70 °С до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ) приводит к снижению исходной теплопроводности с 170-200 Вт/м·°С до 40-50 Вт/м·°С. При последующем увеличении флюенса до $11,7 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ) снижения теплопроводности не наблюдается.

3. Температурная зависимость теплопроводности бериллия, облученного при температуре 70 °С, сохраняет характер линейного снижения для образцов, облученных до флюенса нейтронов $1 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ). При дальнейшем возрастании флюенса до $11,7 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ) теплопроводность от температуры измерения практически не зависит.

4. Теплопроводности бериллия, облученного при температуре 400 °С, сохраняет характер линейного снижения даже при флюенсе быстрых нейтронов $16 \cdot 10^{22}$ см⁻² ($E > 0,1$ МэВ).

5. Установлено, что отжиг при температуре 500 °С в течение 3 часов, образцов бериллия, облученных в реакторе СМ при 70 °С до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22}$ см⁻², приводит к частичному восстановлению теплопроводности, которая возрастает с 45-50 Вт/м·°С до 110-115 Вт/м·°С. Повторное облучение отожженных образцов в реакторе СМ при 70 °С до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{22}$ см⁻² приводит к падению теплопроводности до прежнего уровня в 45-50 Вт/м·°С.

Публикации по теме диссертации:

1. Р.Н. Латыпов «Исследование влияния реакторного облучения и после реакторного отжига на теплопроводность металлического бериллия» // Сборник ДНЦ ПО АТН РФ «Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства», 2000 г., Выпуск 3, часть 1, с. 83-88.

2. V.P. Chakin, V.A. Kazakov, A.A. Teykovtsev, V.V. Pimenov, G.A. Scimansky, Z.E. Ostrovsky, D.N. Souslov, R.N. Latypov, S.V. Belozarov, I.B. Kupriyanov «High dose neutron irradiation damage in beryllium as blanket

material» // 21-st Symposium on Fusion Technology, September 11-15, 2000, Madrid, Spain // Fusion Engineering and Design 58-59 (2001) 535-541.

3. Д.Н. Суслов, Р.Н. Латыпов, О.Г. Сидоренко, В.П. Чакин «Влияние реакторного облучения на теплопроводность металлического бериллия» // Сборник докладов 6-ой Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, 11-15 сентября 2000 г., в 3-х томах, т. 3, ч. 2, г. Димитровград, 2001 г., с. 296-301.

4. В.П. Чакин, В.А. Цыканов, А.В. Клинов, В.А. Казаков, З.Е. Островский, Д.Н. Суслов, Р.Н. Латыпов, Р.Р. Мельдер, В.В. Пименов, Г.А. Шиманский, И.Б. Куприянов «Бериллий в исследовательских реакторах» // Сборник докладов 6-ой Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, 11-15 сентября 2000 г., в 3-х томах, т. 3, ч. 2, г. Димитровград, 2001 г., с. 161-175.

5. Р.Н. Латыпов «Ввод в эксплуатацию импульсной установки измерения температуропроводности» // Сборник ДНЦ ПО АТН РФ «Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства», 2000 г., Выпуск 2, с. 119-123.

6. V.P. Chakin, V.A. Kazakov, R.R. Melder, G.A. Shimansky, S.V. Belozerov, D.N. Souslov, R.N. Latypov, Z.Ye. Ostrovsky, Yu.D. Goncharenko, D.V. Pevtsov, I.B. Kupriyanov «Damage of beryllium under high dose neutron irradiation» // V рабочая группа Международного Энергетического Агентства по бериллию, г. Москва, Россия, 10-12 октября 2001 г. // Перспективные материалы, 2002 г., Специальный выпуск «Сборник трудов V рабочей группы Международного Энергетического Агентства по бериллию», с. 75-84.

7. D.N. Souslov, V.P. Chakin, R.N. Latypov «Influence of high-dose neutron irradiation on thermal conductivity of beryllium» // 10-я международная конференция по материалам ТЯР, ICFRM-10, г. Баден-Баден, Германия, 14-19 октября 2001 г. // Journal of Nuclear materials 307-311 P.1 (2002) 664-667.

8. Р.Н. Латыпов, Д.Н. Суслов «Влияние количества трансмутационного гелия, накопленного при облучении, на теплопроводность реакторного бериллия» // Сборник трудов ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2003 г., Выпуск 1, с. 59-64.

9. Р.Н. Латыпов, В.П. Чакин, Д.Н. Суслов «Влияние метода изготовления и параметров облучения на теплопроводность реакторного бериллия» // Сборник докладов 7-ой Российской конференции по реакторному

материаловедению, г. Димитровград, 8-12 сентября 2003 г., г. Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004, в 3-х томах, т. 3, ч. 3, с. 27-34.

10. V.P. Chakin, R.N. Latypov, D.N. Souslov, I.B. Kupriyanov «Thermal conductivity of beryllium under low temperature high dose neutron irradiation» // 6th IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion, December 2-5, 2003, SEAGAIA, Miyazaki, Japan // Proceedings of the 6th IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion, December 2-5, 2003, SEAGAIA, Miyazaki, Japan, P.119-127.

11. Р.Н. Латыпов, В.П. Чакин, Д.Н. Суслов «Влияние метода изготовления и температуры облучения на теплопроводность реакторного бериллия» // Сборник трудов ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004 г., Выпуск 2, с. 27-31.

12. Р.Н. Латыпов «Воздействие высокодозного низкотемпературного нейтронного облучения на теплопроводность бериллия» // Сборник ДНЦ ПО АТН РФ «Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства», 2005 г., Выпуск 7, Часть 1, с. 178-188.

13. V.P. Chakin, A.O. Posevin, R.N. Latypov, I.B. Kupriyanov «Swelling, Mechanical and Thermophysical Properties of Beryllium Irradiated at 70-440 0C in the wide Range of Neutron Doses» // Proceedings of the 7th IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion, INL/EXT-06-01222, February, 2006, P.27-35.

14. В.П. Чакин, А.О. Посевин, Р.Н. Латыпов «Радиационное повреждение бериллия при 70 – 440 0С и флюенсе нейтронов (0,3-18)·10²² см⁻² (E_n > 0,1 МэВ)» // Атомная энергия, т. 101, вып. 4, с. 289-296, октябрь 2006 г.

15. Р.Н. Латыпов, В.П. Чакин, Д.Н. Суслов «Влияние метода изготовления и температуры облучения на теплопроводность реакторного бериллия» // Сборник статей. Моделирование поведения под облучением реакторных материалов. / Под редакцией д.ф.-м.н. В.В. Светухина, д.ф.-м.н. В.Н. Голованова, д.т.н. В.Д. Рисованого – Ульяновск: УлГУ, 2007. – с. 131-140.

16. V. Chakin, A. Moeslang, M. Svyatkin, A. Posevin, P. Vladimirov, R. Latypov «Beryllium Application for Fission and Fusion» // Proceedings of the International Symposium on Materials Testing Reactors, JAEA Oarai R@D Center, Japan, July 16-17, 2008, P.107-116.

Список цитированной литературы:

[1] Гольцев В.П., Серняев Г.А., Чечеткина З.И. Радиационное материаловедение бериллия. Минск: Наука и техника, 1977.- 96 с.

- [2] Калинин Г.М., Барабаш В.Р. Выбор и обоснование работоспособности материалов внутрикорпусных элементов реактора ИТЭР// Сб. докл. Седьмой Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 8-12 сентября 2003 г. Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004. Т.3. Ч.2. С.260-285.
- [3] Цыканов В.А., Самсонов В.Б., Махин В.М. Универсальное устройство для измерения теплопроводности реакторных материалов до облучения, в процессе и после облучения: Препринт. НИИАР-44(452). – Димитровград: НИИАР, 1980.
- [4] Robert D. Cowan. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures// J. of Applied Physics, 1963. V.34. P.926–927.
- [5] Сандаков В.С. и др. Импульсная установка теплопроводности: Препринт НИИАР П-153. Димитровград: НИИАР, 1972.
- [6] Parker W.J., Jenkins R.J., Abbot G.L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. J. Appl. Phys., 1961. V.32, №9.
- [7] Справочник по теории автоматического управления/ Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987.
- [8] Chakin V.P., Kazakov V.A., Teykovtsev A.A. High dose neutron irradiation damage in beryllium as blanket material// 21-st Symposium on Fusion Technology, Madrid, Spain, September 11-15, 2000. Fusion Engineering and Design, 2001. V.58-59. P.535-541.
- [9] Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационные дефекты и набухание металлов. Киев: Наукова думка, 1988.
- [10] Воеводин В.Н., Неклюдов И.М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. Киев: Наукова думка, 2006.
- [11] Патент РФ № 2192675. Отражатель нейтронов ядерного реактора/ Чакин В.П., Казаков В.А., Клинов А.В., Мельдер Р.Р., Пименов В.В., Святкин М.Н., Туктабиев А.В., Куприянов И.Б.// Зарегистрирован 10.11.2002, Москва.
- [12] Патент РФ № 2184401. Способ эксплуатации бериллиевого блока ядерного реактора/ Чакин В.П., Мельдер Р.Р., Щучкин А.Н., Святкин М.Н., Петелин А.Л.// Зарегистрирован 27.06.2002, Москва.
- [13] Заявка на изобретение, G21C5/00, № 2344503. Отражатель нейтронов ядерного реактора/ Чакин В.П., Ижутов А.Л., Петелин А.Л., Посевин А.О.// 2009.