Филиал
‹‹ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ››
Республиканского государственного предприятия
на праве хозяйственного ведения
‹‹НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН››
МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДК 621.039.55

Самарханов Куаныш Канатулы

Методика проведения реакторных испытаний радиационно-стойких волоконных световодов и волоконно-оптических датчиков в ближнем ИК-диапазоне с in-situ контролем

Работа, представленная на XIX конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов

Национального ядерного центра Республики Казахстан

(прикладные исследования)

Руководитель: Гордиенко Юрий Николаевич,
начальник лаборатории внутриканальных испытаний филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК

Курчатов, 2020

АВТОР

САМАРХАНОВ КУАНЫШ КАНАТУЛЫ,

младший научный сотрудник лаборатории внутриканальных исследований,

Институт Атомной Энергии НЯЦ РК

1994 года рождения,

образование высшее (Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова) (2011-2016 г.)

специальность – ядерная физика,

квалификация по диплому – бакалавр естествознания;

магистратура – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», (2017-2019 г.)

Направление подготовки: Ядерные физика и технологии

Образовательная программа «Теплофизика ядерных энергетических установок»

работает в филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК с 2016 г.

общий стаж работы 3,5 года

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Заместитель начальника лаборатории
внутриканальных испытаний _____ 10.04.2020 Понкратов Юрий Валентинович
подпись, дата

Лаборант ФМИ 8 разряда
лаборатории внутриканальных испытаний _____ 10.04.2020 Толмачев Сергей Вениаминович
подпись, дата

Лаборант ФМИ 8 разряда
лаборатории внутриканальных испытаний _____ 10.04.2020 Слуянов Андрей Николаевич
подпись, дата

Самарханов К.К.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ С *in-situ* КОНТРОЛЕМ

Конкурсная работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан от Филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»

071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10,

тел. (7-722-51) 3-31-25, (9)1-71 (вн.)
факс (7-722-51) 3-31-25
e-mail: samarkhanov@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит: 26 страниц, 17 рисунков, 1 таблицу, 30 источников.

ВОЛОКОННЫЕ ОДНОМОДОВЫЕ СВЕТОВОДЫ, ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ, ИВГ.1М, МЕТОДИКА РЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.

Объект исследования: Радиационно-стойкие одномодовые волоконные световоды (ВС) зарубежных производителей с различным защитным покрытием (медь, высокотемпературный полиимид, алюминий, акрилат) и два типа волоконно-оптических датчиков температуры на основе одной и двух волоконных Брэгговских решеток (ВБР) производства FORC-Photonics.

Цель исследования: изучение влияния комбинированного гамма-нейтронного излучения на пропускную способность радиационно-стойких волоконных световодов, работоспособность и спектральные характеристики волоконно-оптических датчиков температуры.

Задачи исследования:

1. Аналитический обзор литературы по радиационно-оптическим эффектам в волоконных световодах и волоконно-оптических ВБР-датчиках температуры в ближнем ИК-диапазоне;
2. Описание и адаптирование экспериментально-измерительного оборудования, предназначенных для проведения облучательных испытаний;
3. Разработка и изготовление прототипа облучательного устройства;
4. Разработка методики проведения реакторных испытаний радиационно-стойких ВС и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с in-situ контролем
5. Проведение методических экспериментов по испытанию волоконных световодов и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры на ИР ИВГ.1М;
6. Обработка и систематизация экспериментальных данных. Анализ полученных результатов;

Актуальность работы:

Обусловлена востребованностью волоконных световодов и волоконно-оптических датчиков температуры, работающих в ближнем ИК-диапазоне, стойких к воздействию ионизирующего излучения в атомной и термоядерной энергетиках, а также в других отраслях науки.

В рамках методического эксперимента выработан комплекс подходов и

практические рекомендации, направленные на совершенствование внутреннего сегмента ОУ, которые в последующем были использованы для полномасштабных ресурсных испытаний ВС и ВБР-датчиков температуры на ИР ИВГ.1М и ВВР-К. Данные, полученные в ходе облучательных испытаний на ИР ИВГ.1М, позволили сравнить радиационно-стойкие ВС ведущих зарубежных производителей и определить кантидатные ВС и ВБР-датчиков температуры для будущих применений в системах оптической диагности плазмы реактора ИТЭР.

Методика исследования: Аналитический обзор научно-технической литературы; реакторные методы оптической спектральной диагностики; масс-спектрометрический метод.

Результаты работ:

– проведен аналитический обзор литературы по теме исследования;

– приведено детальное описание экспериментального оборудования, предназначенных для проведения облучательных испытаний;

– представлено подробное описание процедуры изготовления прототипа облучательного устройства;

– разработана методики проведения реакторных испытаний радиационно-стойких ВС и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с in-situ контролем;

– проведен методический реакторный эксперимент по испытанию волоконных световодов и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры на ИР ИВГ.1М;

– получены экспериментальные данные методического реакторного эксперимента, проведена обработка и анализ полученных результатов, выработаны методические рекомендации для дальнейших полномасштабных реакторных испытаний.

Научная новизна: Разработана методика проведения реакторных измерений с in-situ контролем, позволившие провести сравнительные испытание радиационно-стойких одномодовых волоконных световодов ведущих зарубежных производителей с различным защитным покрытием в условиях комбинированного нейтронно-гамма облучения. Насколько нам известно, ВС с медным покрытием и волоконно-оптические ВБР-датчики температуры в процессе облучения на ядерном реакторе исследованы впервые.

Практическая ценность: Разработанная методика по испытанию радиационно-стойких волоконных световодов и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры, а также полученные в ходе проведенных методических испытаний экспериментальные данные будут использованы в качестве рекомендации и послужит основой для дальнейших полномасштабных реакторных экспериментов на ИР ИВГ.1М и ВВР-К.

Личный вклад автора: аналитический обзор литературы, участие в подготовке и проведении реакторных экспериментов, обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Уровень конкурентоспособности: Работа выполнена в рамках исполнительного соглашения № 1 между НЯЦ РК и ИТЭР по проекту «Испытания радиационной стойкости волокон и оптоволоконных датчиков для изучения поведения датчиков в условиях ИТЭР».

Разработанная специалистами ИАЭ РГП НЯЦ РК методика реакторных экспериментов с *in-situ* контролем и успешная реализация поставленных задач позволит: во-первых, отработать предложенную методику проведения реакторных измерений, во-вторых, получить новую информацию о спектроскопических свойствах различных ВС и ВБР-датчиков в ближнем ИК-диапазоне в условиях реакторного облучения, в-третьих, выработать практические рекомендации для дальнейших полномасштабных реакторных экспериментов на ИР ИВГ.1М и ВВР-К.

Исследования позволяют в полной мере использовать уникальные возможности ИР ИВГ.1М и его научного потенциала. Продолжение работ в направлении применения

волоконной оптики в атомной и термоядерной энергетиках позволит повысить престиж Казахстана в мировом научном сообществе.

Степень завершенности работы: Работа выполнена в полном объеме, все задачи, поставленные в данной работе успешно завершены.

Публикации: Результаты исследований были представлены на международной конференции и опубликованы в виде сборника материалов конференции (см. Приложение А).

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

ОУ	Облучательное устройство
ИР	Исследовательский реактор
ИВГ.1М	Реактор исследовательский водо-водяной гетерогенный модифицированный
ВВР-К	Казахстанский исследовательский водо-водяной ядерный реактор бассейнового типа
ИТЭР	Международный термоядерный экспериментальный реактор
РБ	Регулирующий барабан
ФКЭ	Физический канал экспериментальный
ЦАЗ	Центр активной зоны
ИК-диапазон	Инфракрасный диапазон
УФ-диапазон	Ультрафиолетовый диапазон
ВС	Волоконные световоды
ВБР	Волоконно Брэгговские решетки
РСЗ	Радиационно-стимулированное затухание
РНП	Радиационно-наведенное поглощение
РЦО	Радиационные центры окраски
Синергетическое воздействие	взаимодействие факторов, при котором эффект оказывается большим, чем сумма влияний от действия отдельных факторов. Дедю И. Экологический энциклопедический словарь. Молд. сов. энцикл., 1990. 406 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 7
1. Литературный обзор 7
2. Экспериментальная часть 9
2.1. Объекты исследований 9
2.1.1. Волоконно-оптические датчики температуры на основе ВБР 10
2.1.2. Радиационно-стойкие одномодовые волоконные световоды 11
2.2. Описание и адаптирование экспериментально-измерительного оборудования для проведения облучательных испытаний 12
2.3. Источник комбинированного гамма-нейтронного потока - ИР ИВГ.1М 13
2.4. Разработка и создание прототипа облучательного устройства 14
3. Методическая часть 18
3.1. Разработка методики проведения реакторных испытаний 18
4. Результаты методических реакторных экспериментов 19
4.1. Анализ полученных результатов 21
5. Выводы и заключение 23
Методические рекомендации для полномасштабных реакторных испытаний 23
Список использованной литературы 25
Приложение А 26

Введение

Исследования явлений, возникающих при воздействии ионизирующего излучения на волоконные световоды (ВС) и волоконно-оптические системы обусловлена востребованностью волоконных световодов, стойких к воздействию корпускулярного излучения, в атомной (волоконно-оптические датчики [1], системы для передачи изображения из ядерных установок [2]) и термоядерной энергетиках (волоконные коллекторы излучения плазмы в системах оптической диагностики плазмы в термоядерных реакторах [3]), оптоэлектронике [4], в космической отрасли [5], лазерной технике [6] и т.д.

Целью данной работы является изучение влияния синергетического воздействия (комбинированного гамма-нейтронного излучения, температуры, давления) на основные параметры радиационно-стойких ВС и ВБР-датчиков, такие как: пропускная способность ВС, работоспособность и спектральные характеристики волоконно-оптических датчиков температуры.

В настоящей работе представлен обзор литературы, посвященный исследованиям радиационно-оптических эффектов, происходящих в нелегированных ВС и волоконно-оптических ВБР-датчиках температуры в ближнем ИК-диапазоне. Приведено описание и адаптирование ВС и ВБР-датчиков температуры, а также экспериментально-измерительного оборудования для проведения облучательных испытаний на ИР ИВГ.1М. Приведено описание и различные этапы сборки конструкции прототипа облучательного устройства (ОУ). Разработана методика проведения реакторных испытаний радиационно-стойких ВС и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с in-situ контролем. Описаны методические испытания датчиков и оптоволокна при различных условиях температуры и накопленного нейтронного флюенса. Приводится интерпретация полученных результатов и выработаны методические рекомендации для последуюших полномасштабных реакторных испытаний.

1. Литературный обзор

Волоконные световоды условно можно разделить на две категории: специальные и телекоммуникационные. Как понятно из названия, телекоммуникационные ВС применяются в различных системах связи. Специальные ВС нашли иное применение. В настоящее время активно развивается направление создания устройств и приборов на основе спецволокон, которые нашли применение в качестве датчиков для контроля различных физических параметров (температуры, давления, механических напряжений и т.д), системах мониторинга протяженных объектов, волоконных лазерах, навигационных устройствах, медицинских приборах и прочее [7].

Известно, что наиболее востребованные в атомной энергетике типы ВС – это одномодовые ВС на основе кварцевого стекла [8]. Стандартные одномодовые ВС (рисунок 1) без покрытия имеют диаметр 125±1мкм.

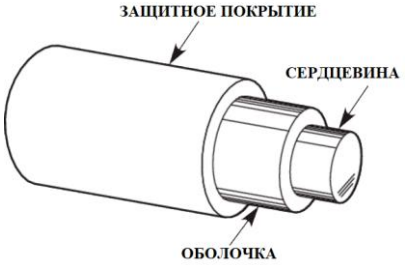


Рисунок 1. Поперечное сечение стандартного одномодового ВС

В рамках данной работы внимание акцентировано на наиболее перспективные нелегированные ВС. Предыдущие работы по исследованию явлений, возникающих при воздействии ионизирующего излучения на нелегированные ВС были проведены, в основном, в видимом спектральном и УФ-диапазонах [9, 10]. На сегодняшний день из ближнего ИК-диапазона используется спектральный интервал ~1,29 – 1,69 мкм и в первую очередь наиболее применяемые длины волн 1,31 и 1,55 мкм [11].

Под действием ионизирующего излучения в сетке кварцевого стекла ВС возникают точечные дефекты, именуемые радиационными центрами окраски (РЦО), которые поглощают световой сигнал, распространяющийся по ВС. Данное явление известно, как радиационно-наведённое поглощение (РНП) светового сигнала или радиационно-стимулированное затухание (РСЗ), согласно некоторым источникам [12]. В результате в ВС возникают радиационно-наведенные потери света, в том числе, в спектральном окне для оптической связи в ближнем ИК диапазоне, приводящие к ошибкам в работе волоконно-оптической системы связи или датчика, вплоть до полной утраты работоспособности. Кроме этого, при достаточно больших мощностях дозы (> 1 Гр/с) наблюдается радиолюминесценция и черенковское излучение, однако, для большинства применений эти эффекты не столь важны, как РНП света. Обеспечение радиационной стойкости ВС означает подавление (минимизация) РНП до приемлемого уровня.

ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла имеют более высокую радиационную стойкость, чем стандартные ВС, легированных германием. Из ряда расчетно-теоретических [13, 14] и экспериментальных работ [15, 16] было установлено, что небольшое добавление фтора в сердцевину позволяет несколько повысить радиационную стойкость ВС. При эксплуатации в условиях ионизирующего излучения, ВС с сердцевиной из чистого кварца имеют значительные преимущества перед ВС с германатной сердцевиной (используемых в линиях оптической связи), поскольку при воздействии ионизирующего излучения в образцах, легированых оксидом германия возникают точечные дефекты (радиационные центры окраски, (РЦО), вызывающие высокие радиационно-наведённые потери (РНП)). Для повышения стойкости к ионизирующему излучению сердцевина ВС должна изготавливаться из чистого кварцевого стекла, или иметь добавки фтора [17] или азота [18].

Если рассматривать механизм повреждения ВС (см. рисунок 2), то он достаточно сложен и в целом описывается схемой, приведенной в [19].

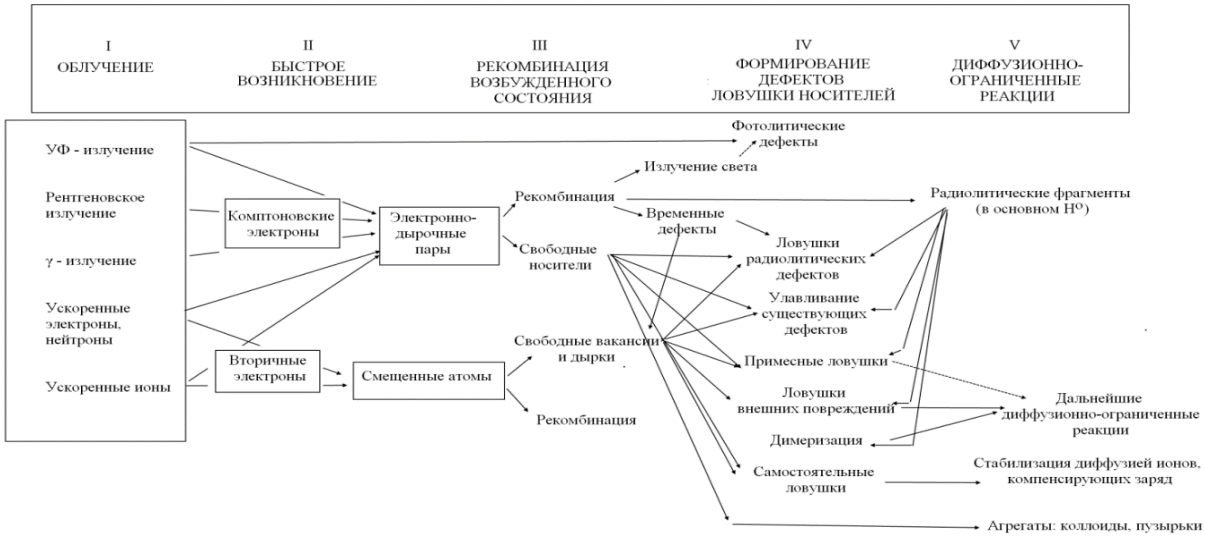


Рисунок 2 – Радиационные механизмы повреждения кварцевого стекла

В настоящее время оснащение ядерных реакторов волоконно-оптическими датчиками на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [20],[21] является растущей тенденцией в развитии атомной промышленности [22], при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций [23], а также целого ряда других отраслях науки [24]. ВБР, устанавливаемые в таких сильных внутриреакторных радиационных полях, в настоящее время интенсивно развиваются (например, см. [25, 26]).

Волоконная решетка Брэгга - дифракционная решетка, локализованная в сердцевине ВС, которая образована за счет периодического изменения показателя преломления кварцевого стекла под воздействием электромагнитного излучения (рисунок 3).

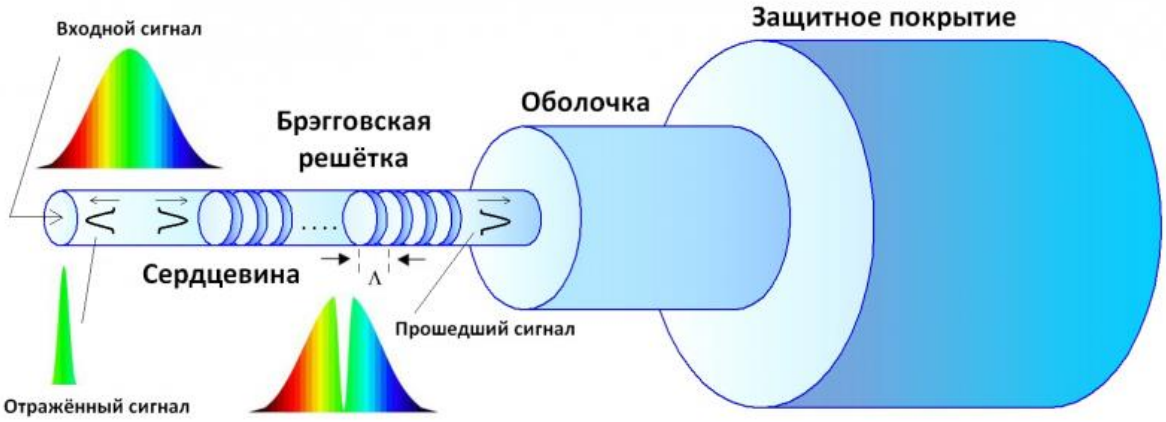


Рисунок 3 – Принцип работы волоконных Брэгговских решеток

Основным параметром ВБР является длина волны брэгговского резонанса λ_B, которая также является центральной длиной волны спектров отражения и пропускания решетки. Эта величина определяется выражением (1):

$$\lambda_B = 2\Lambda \cdot n_{eff} \quad (1)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления для длины волны брэгговского резонанса, Λ – период решетки.

Кроме того, важнейшей характеристикой ВБР является коэффициент отражения. Он показывает, какой процент мощности излучения, попадающего в спектральный диапазон решетки, отражается в обратном направлении ВС. При прохождении излучения через ВС с записанной в него ВБР, происходит его частичное или полное отражение от решетки в определенном спектральном диапазоне. Таким образом, определенную ВБР можно характеризовать с помощью ее спектров отражения и пропускания.

Насколько нам известно, исследование волоконно-оптических датчиков температуры на основе волоконных Брэгговских решеток в условиях комбинированного нейтронного-гамма излучения проводятся впервые. В подразделе 2.1.1 представлена более подробная информация о волоконно-оптических датчиках используемых в данной работе.

2. Экспериментальная часть

Для проведения испытаний в условиях комбинированного гамма-нейтронного излучения были отобраны радиационно-стойкие ВС и волоконно-оптические датчики температуры зарубежных производителей, предоставленных организацией ИТЭР.

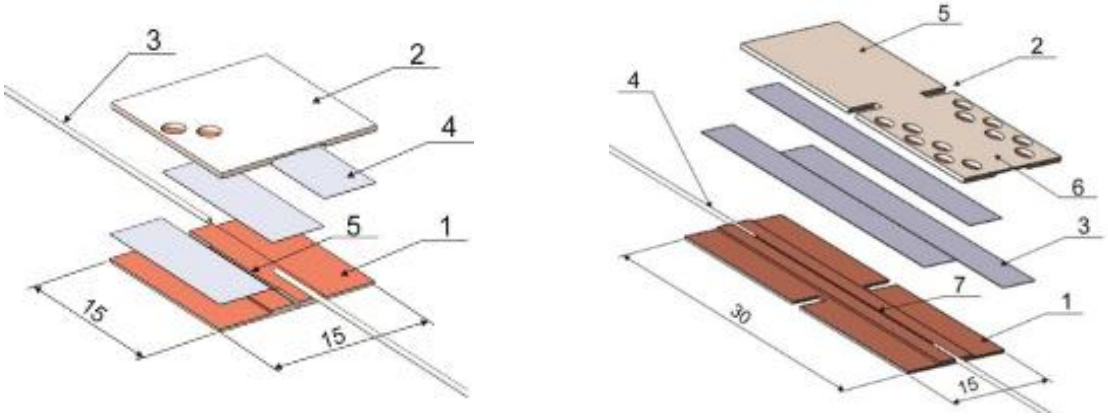
2.1. Объекты исследований

В следующих подразделах приводится описание экспериментальных образцов и экспериментально-измерительного оборудования, предназначенных для проведения облучательных испытаний.

2.1.1. Волоконно-оптические датчики температуры на основе ВБР

В качестве исследуемых оптоволоконных датчиков использовались датчики температуры на основе одной и двух ВБР. Датчики изготовлены FORC-Photonics (ООО «Инновационное предприятие «НЦВО – Фотоника», РФ) с использованием волокон, легированных ионами германия.

Исследуемые датчики температуры представляют собой ВС с медным покрытием с одной и с двумя ВБР, внедренные в сэндвич, состоящий из двух металлических пластин толщиной менее 0,5 мм (рисунок 4).



а) с одной ВБР б) с двумя ВБР

Рисунок 4 – Дизайн датчиков

Габаритные размеры датчиков температуры с одной ВБР составляют 15 × 15 мм, с двумя ВБР – 15 × 30 мм. Толщина датчиков составляет менее 0,8 мм.

Датчик температуры с одной ВБР (рисунок 4а) состоит из нижней (1) и верхней (2) частей корпуса из нержавеющей стали марки 316L, на которых нанесен слой меди методом гальванического осаждения. В нижней части корпуса (1) предусмотрены технологические пазы для укладки оптического волокна с ВБР и закрепления стальной (316L) капиллярной трубки (3) методом лазерной сварки.

Датчик температуры с двумя ВБР (рисунок 4б) состоит из нижней (1) и верхней (2) частей корпуса, на которых нанесен слой меди методом гальванического осаждения. В нижней (1) и верхней (2) частях корпуса имеется визуальное разграничение областей с наличием деформационного влияния на ВБР (6) и области, изолированной от механических воздействий для обеспечения термокомпенсации (5).

В верхней части корпусов (2) предусмотрены технологические пазы для размещения трубок (3 и 4), а также два сквозных отверстия. Эти отверстия позволят локально уменьшить толщину готового макета датчика до величины h = 0,3±0,05 мм, это необходимо для качественного крепления датчика к поверхности измеряемого объекта методом точечной сварки.

Известный принцип работы волоконно-оптических датчиков температуры на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) состоит в измерении сдвига длины волны света, отраженной от ВБР (т.е. сдвиг волны резонанса ВБР). Резонансная длина волны зависит от показателя преломления ВС, который, в свою очередь, может меняться под действием ионизирующего излучения (быстрых нейтронов и / или гамма-лучей), в результате чего излучение влияет на показания датчика. Необходимо заранее выяснить, в какой степени это нежелательное радиационно-индуцированное явление ухудшит точность показаний датчика.

Датчики с двумя ВБР могут работать по принципу компенсации для подавления резонансного сдвига длины волны излучения. На рисунке 5 представлены фотографии датчиков температуры с одной и двумя ВБР.

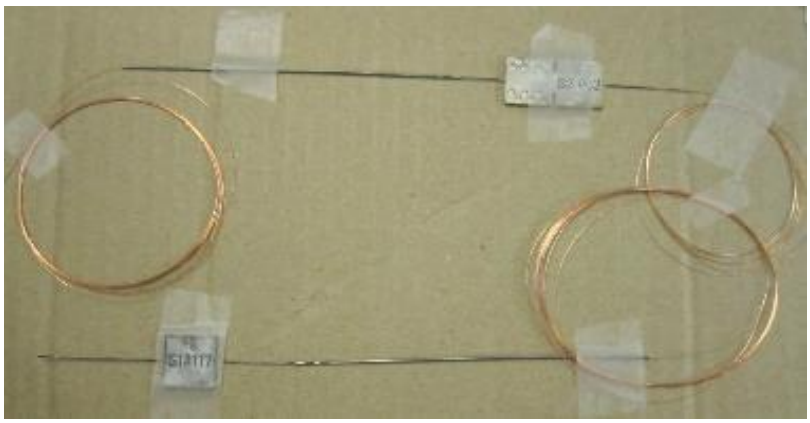


Рисунок 5 – Датчики температуры с одной и двумя ВБР

Однако, кроме подходящих ВБР-датчиков температуры, должны быть соответствующие радиационно-стойкие одномодовые ВС, связанные с волоконно-оптическими датчиками. В подразделе 2.1.2 представлено описание ВС, предназначенных для проведения облучательных испытаний.

2.1.2. Радиационно-стойкие одномодовые волоконные световоды

В таблице 1 представлены наиболее перспективные радиационно-стойкие волоконные световоды зарубежных производителей для облучательных экспериментов на ИР ИВГ.1М (г. Курчатов, Казахстан).

Таблица 1 – Волоконные световоды

№	Производитель	Покрытие
1	RSO14-Pol-	Полиимидное
2	RR-29-Pol	
3	1800	Медное
4	IVG	
5	Draka	Акрилатное
6	HC-05b	
7	iXblu	Алюминиевое
8	FORC-Photonics	

Волокна различались по типу материала защитного покрытия: полиимид, акрилат меди или алюминий (см. таблицу 1). На рисунке 2 показаны фотографии волокон с различным покрытием. Толщина покрытия для медного и алюминиевого – 20 мкм; полиимида – около 10 – 15 мкм; акрилата – 75 мкм.

Рисунок 2 – Фотографии ВС с покрытиями из полиимида, акрилата, алюминия и меди (слева направо)

Сердцевины всех световодов (кроме волокон Draka) – нелегированный диоксид кремния, диаметр примерно от 8 мкм до 10 мкм, далее идет кольцевой слой из легированного фтором, (фтора около 2 масс. %), толщина кольца от 35 мкм до 40 мкм, далее после фторированного кольца опять идет чистый диоксид кремния. У ВС производства Draka все то же самое, однако в сердцевине около 1 масс. % фтора.

2.2. Описание и адаптирование экспериментально-измерительного оборудования для проведения облучательных испытаний

На рисунке 3 представлена общая схема измерения интенсивности светового сигнала, которая была использована в методическом реакторном эксперименте. Общая схема измерения светопроводимости ВС и ВБР-датчиков была разделена на две условные блок-схемы А и Б.

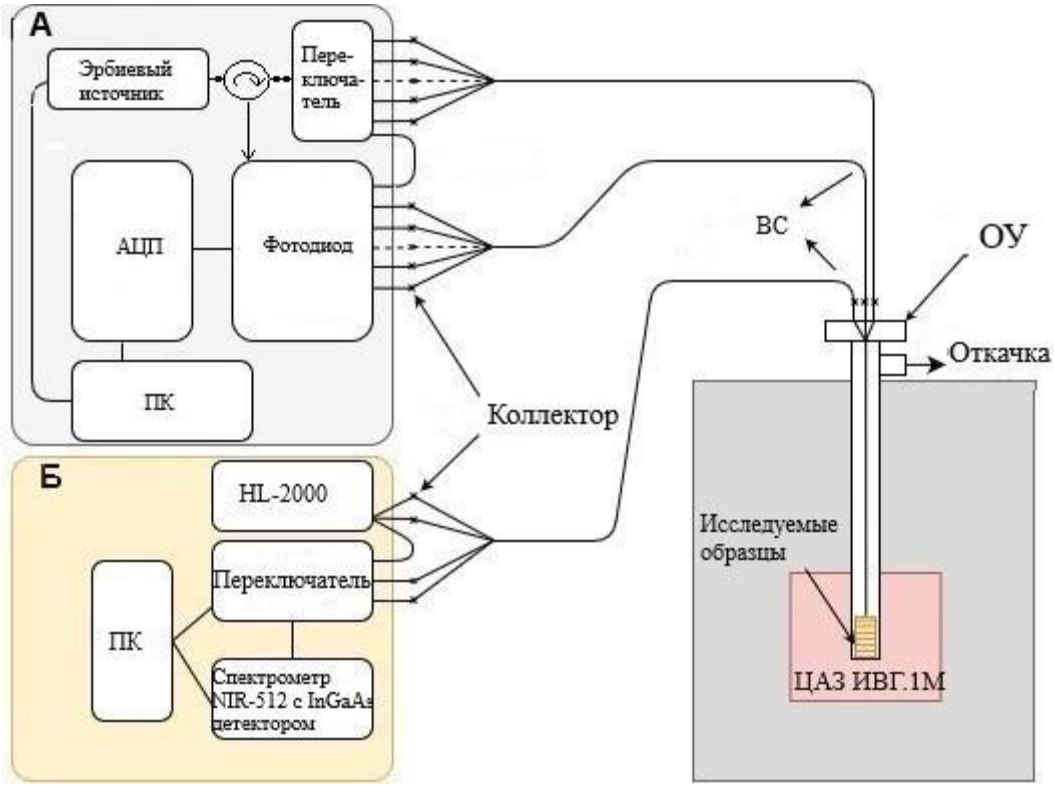


Рисунок 3 – Общая схема измерения

Для изучения влияния ионизирующего излучения на спектральные свойства ВБР-датчиков была разработана автоматизированная измерительная система. В блок-схеме А представлена измерительная система многоканального интеррогатора ВБР-датчиков температуры, используемых в реакторных экспериментах.

Интеррогатор (оптический регистрирующий блок) служит ключевым прибором систем измерения на основе волоконно-оптических датчиков, осуществляя одновременно регистрацию показаний каждого из подключенных датчиков и передачу измеренных показаний оператору.

Излучение от широкополосного источника (EDFS-1), легированного эрбием, проходящего через циркулятор, направляется в нужный канал с помощью оптического переключателя. Узкополосное излучение, отражаемое одним или двумя ВБР, возвращается в фотоприемники. Далее аналоговый сигнал от фотодиода (PDI-4P40-4G-K-R50) преобразуется с помощью АЦП в цифровой и записывается в ПК. В эксперименте будет регистрироваться интенсивность сигнала для длины волны λ=1,55 мкм. Компьютер

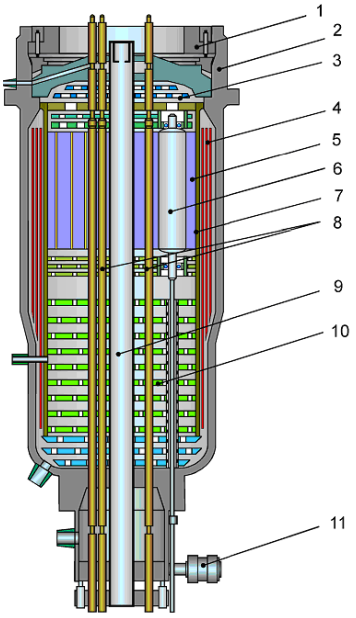
выполняет сбор спектральных данных и синхронизацию работы оптических частей системы.

В блок-схеме Б представлено измерение временной зависимости изменения спектра пропускаемого света в ВС от источника светового излучения. В качестве источника светового сигнала будет использована галогеновая лампа HL2000 (фирмы Ocean Optics) которая будет создавать поток света в исследуемых ВС. Сигнал после прохождения по ВС попадает на опто-механический переключатель и далее на вход спектрометра NIR 512 (фирмы Ocean Optics) с InGaAs-детектором. Затем происходит регистрация и запись спектра светового сигнала в диапазоне 0,9-1,7 мкм. Один из световодов будет идти непосредственно от источника в переключатель и имеет назначение снятия референсного спектра света.

Всё вышереечисленное оборудование было интегрированно в существующую информационно-измерительную систему экспериментального стенда ЛИАНА.

2.3. Источник комбинированного гамма-нейтронного потока - ИР ИВГ.1М

В качестве источника комбинированного гамма-нейтронного потока использовался водоохлождаемый гетерогенный исследовательский ядерный реактор ИВГ.1М [27]. Наличие непрерывного источника, обеспечивающего возможность длительной работы на постоянной мощности – в стационарном режиме, позволяет достаточно подробно изучать влияние ионизирующего излучения на пропускную способность радиационно-стойких волоконных световодов и волоконно-оптических датчиков температуры в широком диапазоне исследуемых параметров. На рисунке 4 представлена схема вертикального разреза ИР ИВГ.1М.



1 – крышка реактора; 2 – корпус реактора; 3 – верхний экран; 4 – боковой экран; 5 – отражатель; 6 – регулирующий барабан (РБ); 7 – центральный канал; 8 – технологические каналы; 9 –физический канал экспериментальный (ФКЭ); 10 – железоводная защита, 11 – привод регулирующих барабанов.

Рисунок 4 – Схема вертикального разреза ИР ИВГ.1М

В центральной части ИР ИВГ.1М установлен корпус экспериментального физического канала (ФКЭ). Корпус ФКЭ используется в качестве канала для размещения экспериментального облучательного устройства. Диаметр верхнего отверстия ФКЭ, предназначенного для загрузки облучательных устройств составляет 60 мм, внутренний

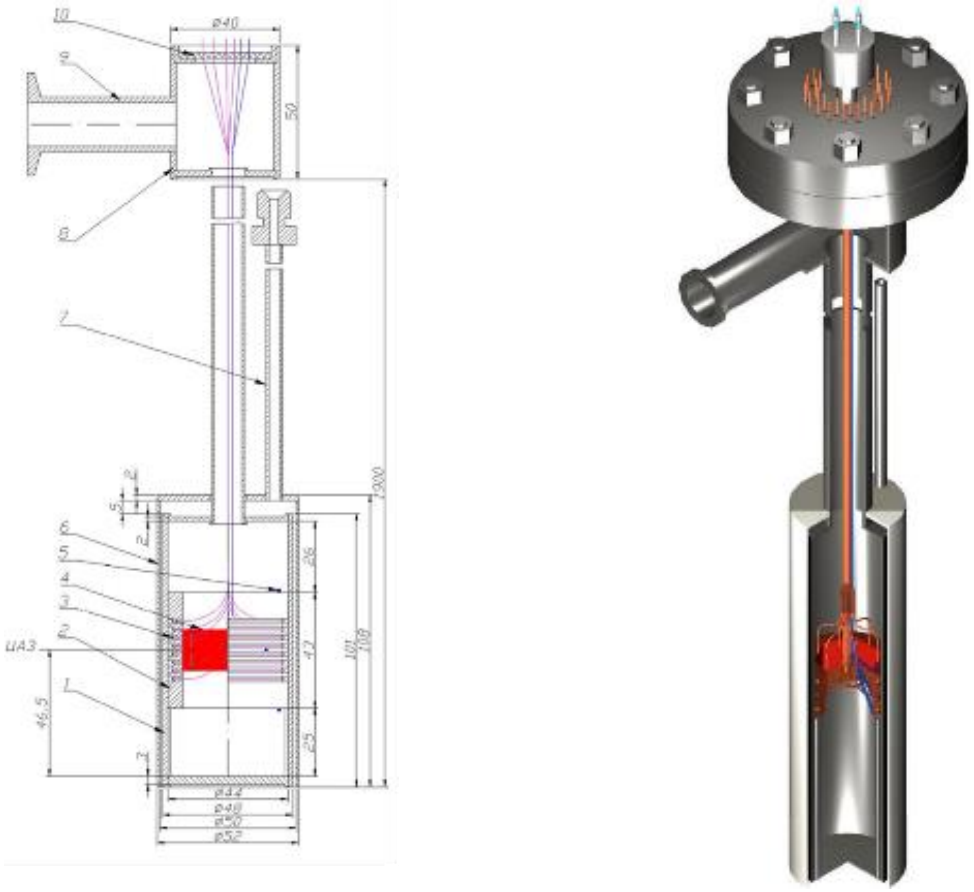
диаметр 68 мм. Расстояние от верхнего торца ФКЭ до ЦАЗ составляет 1710 мм. Реактор не имеет горизонтальных экспериментальных каналов для вывода пучка нейтронов. Единственный вертикальный сухой канал также не оснащен специальными устройствами для вывода нейтронного пучка за пределы реактора и предназначен для проведения внутриреакторных экспериментальных исследований.

Методические реакторные эксперименты по испытанию ВС и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры проводились с использованием экспериментального стенда ЛИАНА [28], расположенного в реакторном зале реактора ИВГ.1М и специально разработанного и созданого прототипа облучательного ампульного устройства.

В рамках НИР были выполнены подготовительные работы экспериментального стенда ЛИАНА к методическим реакторным экспериментам, которые заключались в выборе наиболее кратчайшей и оптимальной магистрали для передачи полезных сигналов из реакторного зала в операторское помещение, подготовке газо-вакуумной, ИИС экспериментального стенда ЛИАНА, а также экспериментально-измерительного оборудования.

2.4. Разработка и создание прототипа облучательного устройства

Для проведения испытаний радиационной стойкости ВС и волоконно-оптических датчиков температуры в условиях комбинированного гамма-нейтронного облучения на стационарном ядерном реакторе ИВГ.1М было разработано облучательное устройство (см рисунок 5).



а) чертеж ОУ б) 3Д-вид

1 – корпус ампулы; 2 – медная втулка; 3 – ВС; 4 – датчик; 5 – термопара; 6 – кожух охлаждения; 7 – труба подачи азота; 8 – узел ввода; 9 – штуцер откачки; 10 – сетка

Рисунок 5 – Облучательное экспериментальное устройство

Облучательное экспериментальное устройство состоит из четырех основных узлов:

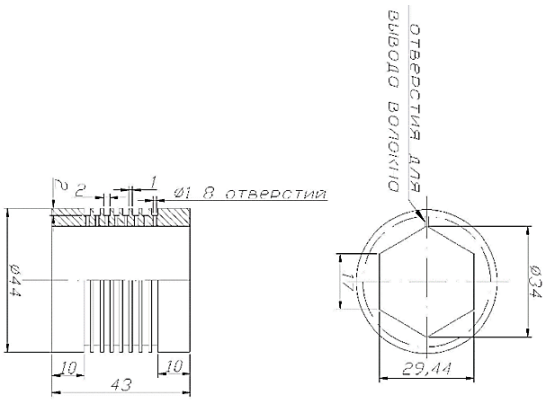
– герметичная откачиваемая облучательная ампула (среда: вакуум);

– внутренний сегмент ампулы на котором устанавливается 2 датчика температуры, 8 катушек оптоволокна (с покрытием Cu, Al, акрилата и полиимида) и 8 референсных катушек оптоволокна, 3 термоэлектрических преобразователя типа ХА;

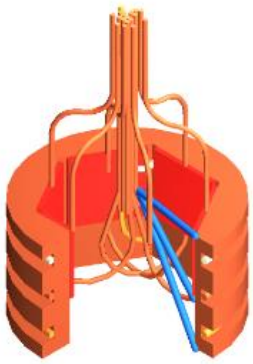
– труба, герметично соединенная с ампулой, через которую от внутреннего сегмента ампулы выводятся ВС и термопары за пределы физической защиты реактора.

– внешний узел, соединенный герметично с трубой, на котором монтируется оптоволоконный гермоввод и патрубок для соединения ОУ с газо-вакуумной системой стенда ЛИАНА.

Внутренний сегмент ампулы представляет собой металлическую втулку из меди с внутренним шестигранником (для установки датчиков) и внешними горизонтально проточенными пазами, предназначенными для укладки оптоволокна. ВС выводится внутрь втулки, для предотвращения повреждения оптоволокна при загибе. ВС из паза выводится или через одно овальное отверстие диаметром, который на порядки больше диаметра волокна, или через два отверстия, просверленных под углом 60° (вход-выход соответственно). Эскизный чертеж и макет данной конструкции приведен на рисунке 6.



а) эскизный чертеж



б) макет, 3Д-вид с установленными датчиками

Рисунок 6 – Внутренний сегмент ОУ

В соответствии с разработанной конструкцией указанной выше были изготовлены комплектующие детали (рисунок 7) прототипа ОУ, предназначенного для проведения методического реакторного эксперимента.

Рисунок 7 – Основные детали облучательного экспериментального устройства

Далее была произведена сборка и монтаж прототипа ОУ. На начальном этапе на внутренний медный сегмент прототипа ОУ были установлены 2 образца оптоволоконных

датчиков (один с одной ВБР и один с двумя ВБР) после чего были установлены термопары: один термоэлектрический преобразователь типа ХА непосредственно на датчик с одной ВБР и две термопары на верхние и нижние части внутреннего сегмента. Затем в предусмотренные конструкцией пазы, расположенные на внешней поверхности сегмента, были уложены образцы ВС и их референсы. Данный этап сборки отображен на рисунке 8.

Рисунок 8 – Сборка внутреннего сегмента ОУ

После произведенного монтажа сегмент был установлен внутрь ампулы, а концы оптоволокна от установленных образцов и термопар через герметично приваренную к ампуле трубу были выведены в верхнюю часть прототипа ОУ (рисунок 9).

Рисунок 9 – Установка внутреннего сегмента в прототип ОУ

Затем в нижнею часть ампулы при помощи аргонно-дуговой электросварки было вварено донышко из нержавеющей стали. В верхней части облучательного устройства был монтирован герморазъем через который из объема ОУ были выведены оптоволоконные концы исследуемых образцов и термопар для соединения с информационно-измерительным оборудованием посредством транспортного оптоволокна и компенсационных термопарных проводов. Герметичность внутреннего объема ОУ обеспечивалась путем заливки герморазъема клеем К-400 (рисунок 10).

Рисунок 10 – Герметизация прототипа ОУ

По завершению вышеописанных работ на нижнюю часть прототипа ОУ был установлен металлический чехол для регулирования температуры образцов. Регулировка температурных полок внутреннего сегмента ОУ осуществляется путем изменения расхода газообразного азота продуваемого между чехлом охлаждения и корпусом ОУ. Далее, прототип ОУ был соединен с газо-вакуумной системой стенда ЛИАНА, размещенного в реакторном помещении ИР ИВГ.1М. Затем были выполнены работы по проверке внутренних объемов ОУ на герметичность методом обдува гелием с использованием квадрупольного масс-спектрометра RGA-100.

Далее, прототип ОУ было загружено в физический экспериментальный канал ИР ИВГ.1М, таким образом, чтобы ОУ с испытуемыми образцами датчиков и ВС находился на уровне ЦАЗ реактора ИВГ.1М. В заключении монтажа термопары при помощи компенсационных проводов были соединены с ИИС стенда ЛИАНА, а оптоволоконные концы исследуемых образцов при помощи сварки и транспортного оптического кабеля были соединены с регистрирующим оптическим оборудованием.

Схема соединения ОУ с рабочими системами стенда ЛИАНА показана на рисунке 11

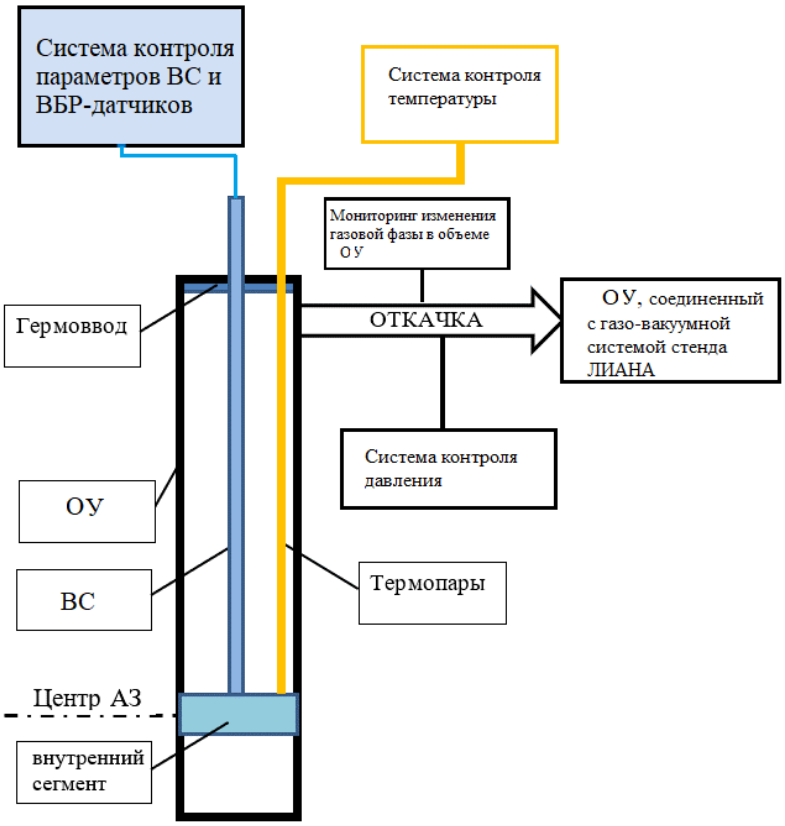


Рисунок 11 – Схема соединения ОУ с рабочими системам стенда ЛИАНА

Такая схема подключения ОУ к системами стенда ЛИАНА позволит реализовать следущее задачи:

– исследуемые образцы, концы которых выведены из ОУ через гермоввод, облучаются в широком температурном диапазоне в условиях непрерывной откачки, в ЦАЗ ФКЭ ИР ИВГ.1М;

– в процессе реакторного эксперимента осуществляется мониторинг изменения газовой фазы в объеме прототипа облучательного устройства и производится контроль показаний термоэлектрических преобразователей;

– во время проведения эксперимента на вход каждого исследуемого образца подается световой сигнал;

– в ходе эксперимента осуществляется контроль и регулирование давления в объеме ОУ посредством откачки вакуумными насосами до заданного уровня давления в ОУ;

– во время эксперимента регистрируются параметры ИР ИВГ.1М (тепловая и нейтронная мощность, и т.д) и проводится регистрация изменения параметров ВС и температурных ВБР-датчиков.

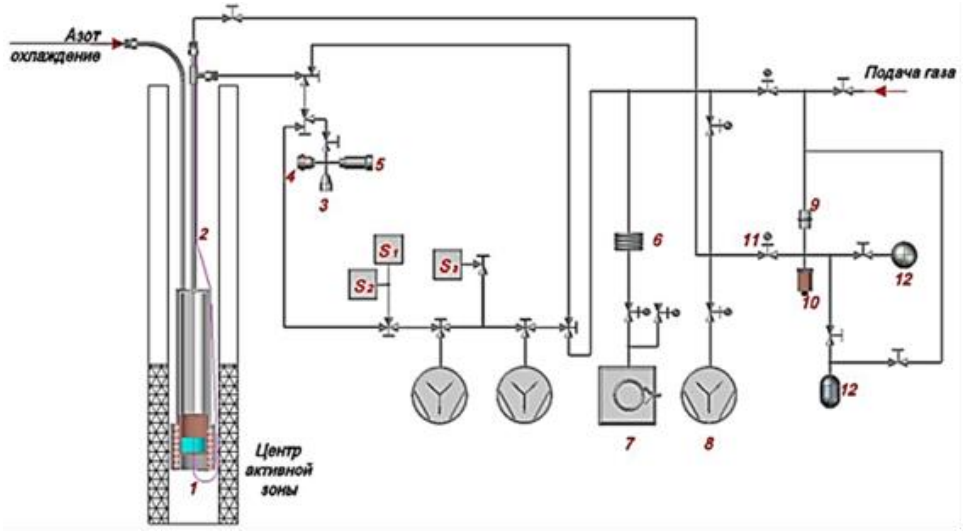
На завершающей стадии подготовительных работ были выполнены необходимые технологические процедуры (откачка, прогрев вакуумных трактов). Таким образом, прототип ОУ был подготовлен к методическому реакторному эксперименту.

3. Методическая частьВ рамках подготовки методических реакторных экспериментов на ИР ИВГ.1М была разработана методика проведения реакторных испытаний ВС и волоконно-оптических температурных датчиков.

3.1. Разработка методики проведения реакторных испытаний

При разработке методики проведения реакторных измерений с *in-situ* контролем необходимо было решить комплекс задач, которые включают в себя: отработку и выбор температурных режимов испытания, определение необходимых требований к вакуумным условиям при проведении реакторных экспериментов, проверка работоспособности регистрирующей аппаратуры в условиях нейтронного облучения и записи экспериментальных данных в режиме реального времени, получаемых непосредственно в ходе проведения реакторных испытаний.

Принципиальная газо-вакуумная схема экспериментального стенда ЛИАНА предсталена на рисунке 12.



1– ОУ с образцами, 2 –термопары, 3 –датчик давления Convec Torr, 4–датчик давления IKD-100, 5-датчик давления IMG-100, 6-азотная ловушка, 7-форвакуумный насос, 8-высоковакуумный (магниторазрядный) насос, 9-водородный фильтр, 10-датчик давления ПМДГ, 11-вакуумный клапан, 12-бак для набора газов, S1, S2, S3-масс-спектрометры

Рисунок 12 – Принципиальная газо-вакуумная схема стенда ЛИАНА

Порядок проведения методического эксперимента был следующим:

1) оценка внесенного ОУ изменения реактивности реактора;

2) откачка объема ОУ высоковакуумным насосом до давления 10^{-2} Торр и запуск регистрирующей аппаратуры для прогрева и установления стационарных значений;

3) снятие опорных (фоновых) спектров светового излучения от калиброванного источника, прошедшего через испытуемые ВС;

4) выход реактора на минимально контролированный уровень мощности реактора (МКУ) – 1 кВт;

5) регулировка подачи газообразного азота в систему охлаждения ОУ;

6) вывод реактора ИВГ.1М на заданный стационарный уровень тепловой мощности;

7) непрерывная регистрация изменения давления в объеме ОУ, температуры корпуса медного сегмента ОУ (верх, низ) и корпуса оптического датчика, изменение светопроводимости ВС, показания оптических датчиков температуры (ВБР);

8) каждые пять минут регистрация светового сигнала (на длине волны 1,55 мкм) прошедшего через испытуемые ВС;

9) изменение температуры корпуса внутреннего сегмента до заданных значений и выдержка на данных температурных полках в течение заданного оператором времени;

10) осуществление планового останова реактора;

11) проведение регистрации всех параметров, описанных в п.8 в течение еще 30 минут.

4. Результаты методических реакторных экспериментов

Методический эксперимент по испытанию радиационной стойкости ВС и ВБР-датчики проводились в условиях облучения на реакторе ИВГ.1М при стационарном потоке быстрых нейтронов $2{,}39 \cdot 10^{13}$ н/см^2·с и γ-облучении 1570 Гр/с.

Условия проведения методического реакторного эксперимента представлены ниже:

– количество исследуемых датчиков	2 шт. (с одной и с двумя ВБР);
– количество волоконных световодов	6 шт.;
– температурный диапазон ампулы ОУ	от 50 °С до 750 °С;
– давление в объеме ОУ	от 1 Торр до 10^{-2} Торр;
– тепловая мощность реактора	6 МВт;
– время облучения	2 ч

На рисунке 13 представлена диаграмма реакторного методического эксперимента. На диаграмме показано изменение температуры внутреннего сегмента ОУ (одна термопара установлена в верхней части, другая в нижней части сегмента), изменение температуры корпуса оптического датчика температуры, изменение давления в объеме ОУ и изменение тепловой мощности ИР ИВГ.1М в процессе реакторного эксперимента.

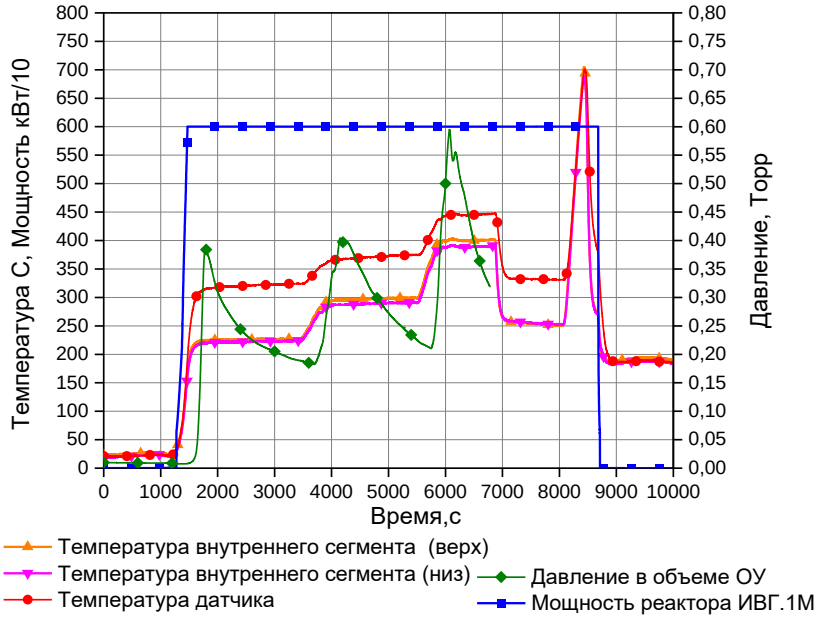


Рисунок 13 – Диаграмма методического реакторного эксперимента

В результате проведенного методического реакторного эксперимента были получены временные и температурные зависимости изменения величины сигналов проходящих через ВС (рисунок 14) и волоконно-оптические датчики (рисунок 14) на длине волны 1,55 мкм в процессе комбинированного гамма-нейтронного облучения.

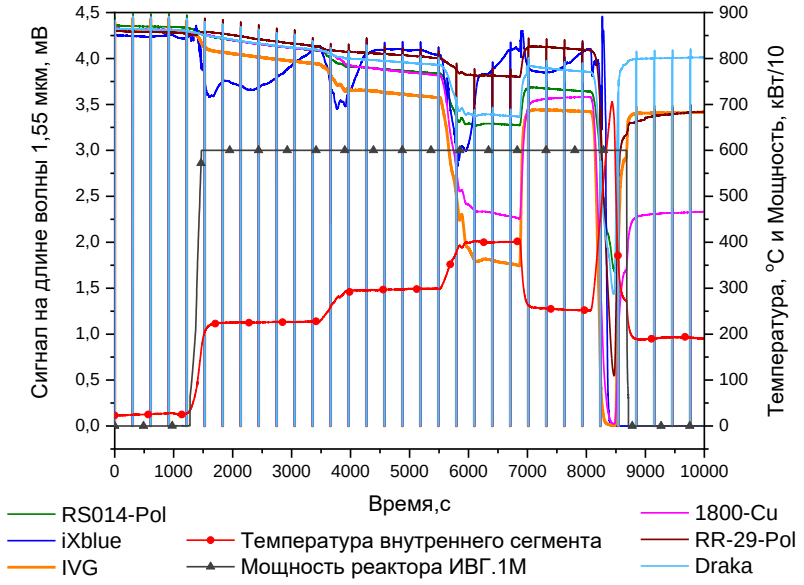


Рисунок 14 – Временная и температурная зависимость изменения величины сигналов проходящих через световоды на длине волны 1,55 мкм в процессе облучения

Вертикальные линии на графике, это интервал времени, при котором осуществлялась регистрация люминесценции световодов при выключенном источнике (около 5 с).Из рисунка 15 видно, что при повышении температуры ОУ до 490 °С вышел из строя оптический датчик с двумя ВБР. Другой оптический датчик повышение температуры отработал в штатном режиме.

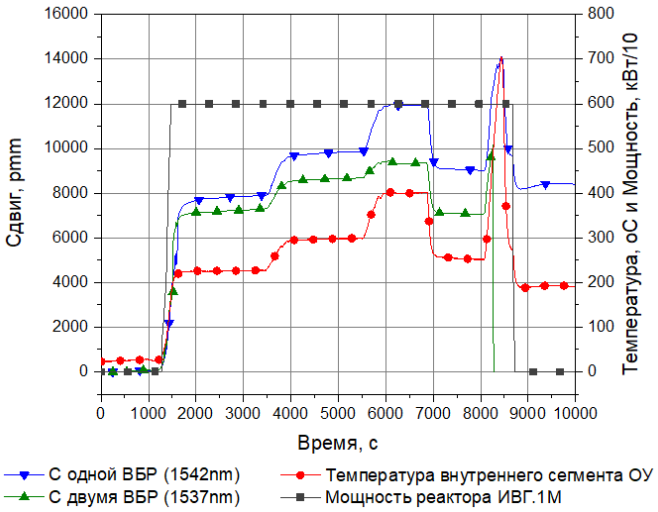


Рисунок 15 – Временная зависимость сигналов исследуемых датчиков и показаний термопары в процессе облучения

Также в результате проведенного методического эксперимента на реакторе ИВГ.1М. были отработаны режимы охлаждения ОУ с целью достижения и стабилизации заданных значений температуры внутреннего сегмента ОУ, определена степень возможного разряжения в объеме ОУ создаваемая вакуумной системой стенда ЛИАНА в процессе реакторного облучения.

4.1. Анализ полученных результатов

В ходе проведенного анализа экспериментальных данных полученных в методическом эксперименте были расчитаны радиационно-наведенные потери (РНП) исследуемых световодов на длине волны 1,55 мкм и определена зависимость этих потерь от температуры исследуемых световодов (рисунок 16).

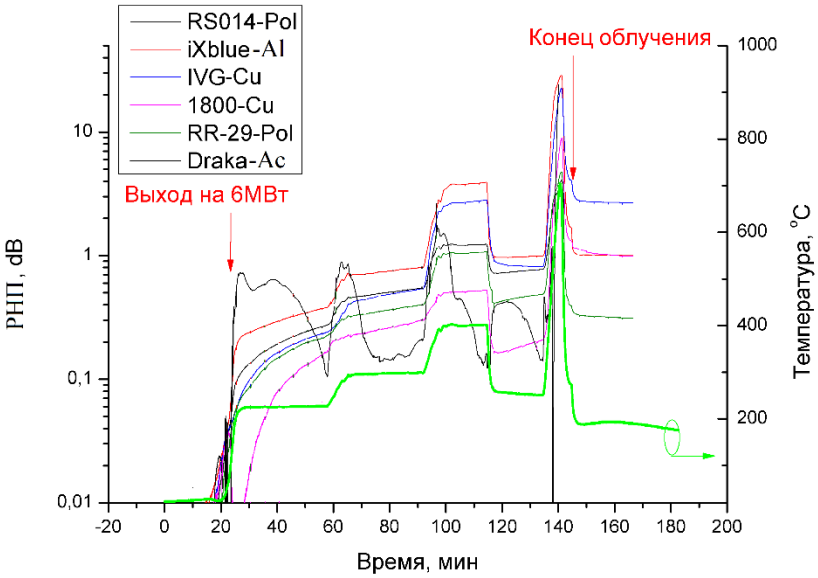


Рисунок 16 – Временная зависимость рассчитанных радиационно-наведенных потерь (РНП) исследуемых световодов на длине волны 1,55 мкм (шкала слева) и температуры (шкала справа) в процессе реакторного облучения

Для получения корректного значения РНП на единицу длины (в данном случае на метр) для каждого исследуемого ВС использовался еще и референсный ВС меньшей длины. РНП рассчитывалось по следующей формуле:

$$RIA(t) = \frac{10}{\Delta L}\left(lg\frac{I_s(0)}{I_s(t)} - lg\frac{I_r(0)}{I_r(t)}\right) \qquad (1)$$

где *RIA(t)*- РНП в момент времени *t;*

$I_r(0)$, $I_s(0)$- интенсивность сигнала от референсного и исследуемого световодов до начала облучения;

$I_r(t)$, $I_s(t)$- интенсивность сигнала от референсного и исследуемого световодов в момент времени *t;*

ΔL-разница длин исследуемого и референсного световодов.

Большая часть ВС для каждого температурного диапазона показывает монотонный рост РНП в процессе облучения. Однако, ВС Draka-Ac выбивается из общей картины. Причиной этого, по всей видимости, является то, что данный ВС имеет акрилатное защитное покрытие, в отличие от остальных ВС. Известно, что данное покрытие применялось только до температуры 150° С, а в нашем случае облучение проводилось в достаточно широком температурном диапазоне. По всей вероятности, это привело к деструкции (деградации) защитного покрытия, что, в свою очередь, могло сказаться на волноводных свойствах ВС, например, посредством возникновения микроизгибных потерь. Стоит отметить, что в немногочисленных работах, посвящённых исследованию ВС при близких к нашим условиях, например [29, 30], РНП на длине волны 1,55 мкм было в 2-2,5 раз больше чем в нашем случае.

Также были проанализированы данные полученные с датчиков ВБР и построена зависимость сигналов исследуемых датчиков и показаний термопар в процессе облучения (рисунок 17).

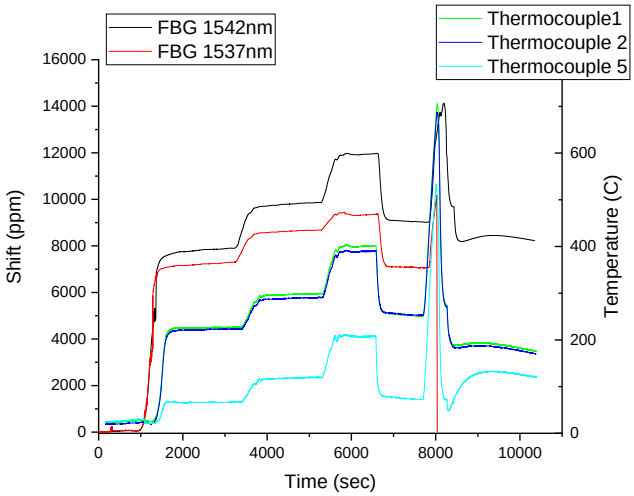


Рисунок 17 – Временная зависимость сигналов исследуемых датчиков и показаний термопар в процессе облучения

Основным эффектом, наблюдаемым при комбинированном нейтронном и гамма-облучении как свободных ВБР, так и ВБР, припаянных в корпусе датчика, является вызванное температурой изменение длины волны резонанса (собственная температурная чувствительность решеток: ~ 7 ppm/K для свободного ВБР и ~ 20 ppm/K для паяного ВБР). Также методический эксперимент показал что, что ВБР, припаянные в корпусе датчика из нержавеющей стали STEMET 1101, не пострадали в активной зоне ядерного реактора и в большинстве случаев при изменении режимов эксперимента не меняли свои спектральные свойства и оставались пригодными для измерения температуры.

Был проведен анализ параметров методического реакторного эксперимента (температура корпуса АУ, температура внутрикамерного сегмента, вакуумные условия и масс-спектры остаточных газов в АУ и т.п.) зарегистрированных при различных режимах испытаний.

В результате анализа этих параметров были сделаны следующие выводы:

– минимальная температура внутреннего сегмента, которая была обеспечена при данной конструкции ОУ и системе охлаждения (при максимальном допустимом расходе азота), составила 225 ± 3 °С;

– данная конструкция ОУ позволяет фиксировать температуру внутреннего сегмента на заданном уровне и менять температуру сегмента с шагом 50 °С в интервале от 225 °С до 400 °С;

– показания термопар, установленных на внутреннем сегменте ОУ свидетельствуют о минимальном градиенте температуры по всему объему сегмента.

– созданная система измерений позволяет проводить регистрацию всех заданных величин при реактоном облучении.

5. Выводы и заключение

В ходе выполнения данной работы был проведен аналитический обзор литературы по радиационно-оптическим эффектам в волоконных световодах и волоконно-оптических ВБР-датчиках температуры в ближнем ИК-диапазоне.

Разработана методика проведения реакторных испытаний радиационно-стойких ВС и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с *in-situ* контролем. В процессе подготовки проведения методических реакторных испытаний был разработан и изготовлен прототип облучательного устройтсва, адаптировано экспериментально-измерительное оборудование, предназначенных для проведения облучательных испытаний, подготовлены технологические системы экспериментального стенда ЛИАНА.

Проведен методический эксперимент по испытанию волоконных световодов и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры на ИР ИВГ.1М. Получена новая информация о спектроскопических свойствах различных ВС и ВБР-датчиков в ближнем ИК-диапазоне в условиях реакторного облучения.

Проведя анализ результатов методического эксперимента можно сделать вывод, что разработанная конструкция прототипа ОУ и система измерений позволило проводить регистрацию всех заданных величин в условиях реакторного облучения. Предложенная методика проведения реакторных испытаний была успешно апробирована.

Анализ результатов проведенного методического реакторного эксперимента позволили сформулировать некоторые рекомендациии для последующих полномасштабных и ресурсных реакторных испытаний.

Методические рекомендации для полномасштабных реакторных испытаний

При сборке ОУ были обозначены следующие положения:

– для качественного и плотного монтажа оптических датчиков температуры на внутренние стенки медного сегмента необходимо рассмотреть возможность разделения внутреннего сегмента на две части. При этом учесть крепеж при сборке сегмента в единый узел после установки на нем испытуемых датчиков температуры.

– для более плотного крепления оптических датчиков на стенки сегмента рассмотреть возможность крепления их с помощью медных винтов;

– для уменьшения натяжения волоконных световодов при намотке их в пазы внутреннего сегмента ОУ предусмотреть технологические пазы на сегменте для регулировочных штифтов.

Результаты методического эксперимента и рекомендации по усовершенствованию внутреннего сегмента ОУ в последующем были использованы для проведения дальнейших испытаний радиационной стойкости волокон и оптоволоконных датчиков, проводимых на ядерном реакторе ИВГ.1М.

Список использованной литературы

1 K. Dulon “Optic sensors. Testing the resistance to radiation,” ITER Newsline, 2 Jul 2018 [Online]. Available: https://www.iter.org/newsline/-/3062.

2 Obara K., Kakudate S., Oka K. et al. // Proc. SPIE. - 1994. - Vol. 2425. P. 106-114.

3 Kakuta T., Shikama T., Nishitani T. et al. // Journal of Nuclear Materials. - 2002. - Vol. 307-311, Part 2. - P. 1277-1281.

4 Арбузов В. И. Основы радиационного оптического материаловедения //СПб: СПб ГУ ИТМО. – 2008.

5 Girard S. et al. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications //Journal of Optics. – 2018. – Т. 20. – №. 9. – С. 093001.

6 Firstov S. V., Alyshev S. V., Melkumov M. A., Riumkin K. E., Shubin A. V. and Dianov E. M., Bismuth-doped optical fibers and fiber lasers for a spectral region of 1600–1800 nm // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39. – Issue 24. –P. 6927–6930

7 Е.М. Дианов «На пороге пета-эры». Успехи физических наук, том 183, №5, с.511-518 (2013

8 Дианов Е. М. и др. Радиационные центры окраски в волоконных световодах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла //Физика и химия стекла. –1982. – Т. 8. – №. 2. – С. 192-199.

9 Anoikin E. V. et al. UV and gamma radiation damage in silica glass and fibres doped with germanium and cerium //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1992. – Т. 65. – №. 1-4. – С. 392-396.

10 Anoikin E. V. et al. Effects of exposure to photons of various energies on transmission of germanosilicate optical fiber in the visible to near IR spectral range //Journal of non-crystalline solids. – 1994. – Т. 179. – С. 243-253.

11 E. Desurvire "Optical Communication in 2025", 31st European Conference on Optical Communication, ECOC-2005, Glasgow, UK, 25-29 September 2005, paper Mo 2.1.3

12 Tomashuk A.L., Golant K.M., Dianov E.M. et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. - 2000. - Vol. 47, № 3, Part 1. -P. 693-698.

13 Skuja L. N., Silin A. R. Optical properties and energetic structure of non-bridging oxygen centers in vitreous SiO2 //physica status solidi (a). – 1979. – Т. 56. – №.1. – С. K11-K13.

14 Edwards A. H. Theory of the self-trapped hole in a-SiO 2 //Physical review letters. – 1993. – Т. 71. – №. 19. – С. 3190.

15 Girard S., Baggio J., Bisutti J. 14-MeV Neutron, gamma X-Ray, and Pulsed XRay Radiation-Induced Effects on Multimode Silica-Based Optical Fibers //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Т. 53. – №. 6. – С. 3750-3757.

16 Girard S. et al. Radiation effects on silica-based preforms and optical fibers—I: Experimental study with canonical samples //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – Т. 55. – №. 6. – С. 3473-3482.

17 Risch B. G. et al. Optical fiber and cable reliability for high radiation environments //Proceedings of the 61st International Wire and Cable Symposium.– 2012. – Т. 61. – С. 543-551.

18 Shibata S., Nakahara M. Fluorine and chlorine effects on radiation-induced loss for GeO2-doped silica optical fibers //Journal of lightwave technology. – 1985. –Т. 3. – №. 4. – С. 860-863.

19 Griscom D. L. Nature of defects and defect generation in optical glasses //Radiation Effects on Optical Materials. – International Society for Optics and Photonics, 1985. – Т. 541. – С. 38-60.

20 J. Canning, “Fiber gratings and devices for sensors and lasers,” Lasers and Photonics Reviews, vol. 2, no. 4, 275-289, 2008.

21 C. E. Campanella, A. Cuccovillo, C. Campanella, A. Yurt, V. M. N. Passaro, “Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications,” Sensors, vol. 18, Art 315, 2018. DOI:10.3390/s18093115.

22 P. Ferdinand, S. Magne, G. Laffont, “Optical fiber sensors to improve the safety of nuclear power plants,” Photonic Sensors, pp. 1-7, 2014. DOI: 10.1007/s13320-013-0138-z

23 А.Н. Серьёзнов и др. Применение оптоволоконных технологийпри создании встроенных системсамодиагностики авиационных конструкций. Научный вестник НГТУ. том 64, № 3, 2016, с. 95–105. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-95-105

24 O. V. Butov, A. P. Bazakutsa, Yu. K. Chamorovskiy, A. N. Fedorov, I. A. Shevtsov, “All-Fiber Highly Sensitive Bragg Grating Bend Sensor”, Sensors, vol. 19, no. 19, Art 4228, 2019, https://doi.org/10.3390/s19194228

25 O.V. Butov, Y.K. Chamorovskii , K.M. Golant, I.A. Shevtsov, A.N. Fedorov, “Fibers and sensors for monitoring nuclear power plants operation”, Proc. SPIE, vol. 9157, Art 91570X, 2014. DOI: 10.1117/12.2059041.

26 G. Cheymol, L. Remy, A. Gusarov, D. Kinet, P. Mégret, G. Laffont, T. Blanchet, A. Morana, E.Marin, S..Girard,, “Study of fiber Bragg grating samples exposed to high fast neutron fluences,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 65, no. 9, pp. 2294-2501, 2018. DOI: 10.1109/TNS.2018.2820505.

27 Sadvakassova A.O. et. al. Research of Reactor Radiation Influence upon Processes of Hydrogen Isotopes Interaction with Materials of the Fusion Facility. Fusion Science and Technology. 2011. 60(1T), P. 9–15. doi:10.13182/fst11-a12398

28 Гордиенко Ю.Н. и др. Применение метода водородопроницаемости в реакторных экспериментах по исследованию взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами. Известия Томского Политехнического Университета.– 2014.– Вып. 2, Т. 324.– 149-162 с.

29 Cheymol G. et al. High level gamma and neutron irradiation of silica optical fibers in CEA OSIRIS nuclear reactor //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008. – Т. 55. – №. 4. – С. 2252-2258.

30 Brichard B. et al. Radiation effect in silica optical fiber exposed to intense mixed neutron-gamma radiation field //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2001. – Т. 48. – №. 6. – С. 2069-2073.

Приложение А

Список публикаций по теме исследований

Тезисы:

Понкратов Ю.В., Кульсартов Т.В., Барсуков Н. И., Бакланова Ю.Ю., Гордиенко Ю.Н., Иркимбеков Р.А., Сураев А.С., Витюк Г.А., Кашайкин П.Ф., Игнатьев А.Д. Устройство для испытаний радиационной стойкости оптоволокна и оптоволоконных датчиков температуры, применяемых в реакторе ИТЭР // Тезисы докладов II Международного научного форума «Ядерная наука и технологии» (12-я Международная конференция «Ядерная и радиационная физика», 1-я Международная конференция «Ядерные и радиационные технологии в медицине, промышленности и сельском хозяйстве», 10-й Семинар по развитию азиатских баз данных по ядерным реакциям) – Алматы: РГП ИЯФ.– 2019.– С. 152.