Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Филиал «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр» Республики Казахстан

на правах рукописи

Гныря Вячеслав Сергеевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПРИ ГАММА-НЕЙТРОННОМ РЕАКТОРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор Тюрин Юрий Иванович

Томск – Курчатов – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ СМЕШАННОГО ГАММА-НЕЙТРОННОГО РЕАК-
ТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КВАРЦЕВОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО (ОБЗОР
ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ) 14
1.1 Структура, основные типы и свойства оптического волокна14
1.2 Механизмы взаимодействия ионизирующего излучения с материалом
оптического волокна при реакторном облучении18
1.3 Радиационно-индуцированное поглощение (РИП) света в оптических
волокнах на основе кварцевого стекла при реакторном облучении 21
1.4 Радиационно-индуцированная люминесценция (РИЛ) света в оптическом
волокне на основе кварцевого стекла
1.5 Радиационно-индуцированное изменение показателя преломления (РИПП)
под действием реакторного излучения
1.6 Выводы по главе 1 35
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ
2.1 Характеристики исследуемых оптических волокон
2.2 Установка для исследования РИП на длине волны 1,55 мкм 45
2.3 Установка для исследования спектров РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм 47
2.4 Характеристики и описание исследовательского реактора ИВГ.1М, общая
схема эксперимента 48
2.5 Выводы по главе 2
ГЛАВА З. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО АМПУЛЬ-
НОГО УСТРОЙСТВА (АУ)
3.1 Волоконно-оптические датчики температуры на основе ВБР 54
3.2 Радиационно-стойкие одномодовые волоконные световоды 56
3.3 Разработка и создание облучательного ампульного устройства 57

3.4 Компьютерное моделирование 61
3.5 Разработка методики проведения реакторных испытаний 63
3.6 Результаты методического реакторного эксперимента 64
3.7 Выводы по главе 3 70
ГЛАВА 4. НАВЕДЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ОВ ПРИ СМЕШАННОМ
ГАММА-НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ72
4.1 Предреакторные лабораторные исследования образцов ОВ 72
4.2 Исследование зависимости РИП на длине волны 1,55 мкм 77
4.3 Исследование спектров РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм 87
4.4 Исследование радиолюминесценции в процессе облучения
4.5 Выводы по главе 493
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 100
Приложение А. Ампульное устройство. Патент РК № 4912 107
Приложение Б. Приложение Б. Акт внедрения 108

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, оснащённость ядерных установок оптическими волоконными световодами (далее «оптическое волокно» или OB, а также BC) и оптоволоконными датчиками на основе волоконных брэгговских решеток (BБP) [1-5] является активно растущей тенденцией в атомной промышленности [3, 6] и науке [7]. Уже сейчас разработаны и применяются датчики на основе BБР для внутриканальных применений в ядерных реакторах [7-11]. Также использование оптических волокон и датчиков на их основе является активно растущим направлением в развитии систем диагностики импульсных [12, 13] и квазистационарных [14-17] термоядерных установок. Применимость OB в диагностических системах была уже успешно продемонстрирована на протяжении десятилетий на исследовательских токамаках JET (Joint European Torus) [18] и TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) [19]. В международном термоядерном реакторе ИТЭР больше половины параметров плазмы планируется измерять оптическими и лазерными системами, неотъемлемой частью которых являются OB [16].

Кроме оптических волокон, интегрированных в системы диагностики плазмы, планируется их использование в ИТЭР в качестве транспортных для передачи оптического сигнала на длине волны 1,55 мкм от датчиков температуры, деформации и ряда других величин на основе ВБР [20], обладающих высокой радиационной стойкостью вплоть до флюенса быстрых нейтронов ~10<sup>20</sup> н/см<sup>2</sup> [21, 23]. Более тысячи волоконно-оптических датчиков будет закреплено на диверторе и бланкете для диагностики их состояния [20].

В процессе смешанного гамма-нейтронного облучения в оптических волоконных световодах на основе аморфного диоксида кремния (кварцевого стекла) происходит образование радиационно-индуцированного поглощения (РИП) света, радиационно-индуцированной люминесценции (РИЛ), а также, при высоких флюенсах, происходит изменение плотности стекла, сопряженное с изменением его показателя преломления – радиационно-индуцированное изменение показателя преломления (РИИПП) [13]. Среди этих явлений, на радиационную стойкость (в части оптических потерь) в ближнем ИК-диапазоне наибольшее влияние оказывает именно РИП [13].

Однако, стоит отметить ограниченное количество работ, посвященных экспериментальным исследованиям воздействия различных видов излучений на природу изменений физических свойств световодов, в частности, исследованию РИП одномодовых ОВ в ближнем ИК-диапазоне на длине волны 1,55 мкм, на которой работает большинство современных оптоволоконных датчиков, до доз и флюенсов, соответствующих ИТЭР [24-31]. Превалирующее большинство работ посвящено исследованию свойств многомодовых ОВ в видимом, наиболее подходящем для диагностики плазмы, диапазоне. Таким образом, исследование РИП одномодовых ОВ и оптоволоконных датчиков на их основе в ближнем ИК-диапазоне на длине волны 1,55 мкм является актуальной задачей.

Известно, что для видимого диапазона наиболее радиационно-стойкими являются оптические волокна с нелегированной сердцевиной из кварцевого стекла, содержащего молекулярный водород [17, 32]. Однако, насыщение водородом ОВ, работающих в ближнем ИК-диапазоне не приемлемо из-за полос поглощения H<sub>2</sub> на рабочей длине волны 1,55 мкм [33].

Наиболее радиационно-стойкими оптическими волокнами в ближнем ИКдиапазоне являются OB с нелегированной и легированной фтором сердцевиной из кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой [13]. При высоких флюенсах в OB такого типа на длине волны 1,55 мкм РИП обусловлено длинноволновым полосой поглощения с максимумом на длинах волн  $\lambda$ >1,7 мкм, которое монотонно возрастает с поглощенной дозой [24, 29]. Физическая природа данного РИП до сих доподлинно неизвестна.

Стоит отметить, что из-за специфики расположения ОВ в ИТЭР существует необходимость использовать специальные высокотемпературные покрытия, которые могут быть исполнены на основе металлов или органических соединений. Ожидаемые рабочие температуры будут в интервале 150-250 °C [34] в этом диапазоне могут работать ОВ с полиимидным, алюминиевым и медным покрытиях. Кроме того, еще одной особенностью является условие работы ОВ в

5

вакууме. Однако, работы по совместному влиянию реакторного облучения, высокой температуры и вакуума на радиационную стойкость ОВ до начала данного диссертационного исследования отсутствовали, в этой связи, разработка экспериментальных методов изучения физических свойств световодов, с обозначенными выше свойствами, и природы их изменения, равно как и сами экспериментальные исследования воздействия на них реакторного излучения, температуры и вакуума является важной задачей физики конденсированного состояния в сфере применения ОВ в ядерной и термоядерной науке и технике.

## Цель работы

Таким образом, целью диссертационной работы было исследование радиационной стойкости в ближнем ИК-диапазоне в одномодовых оптических волокнах на основе кварцевого стекла с различными защитными покрытиями при смешанном гамма-нейтронном облучении в вакууме.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1. Разработка облучательного ампульного устройства (АУ), в котором будут находиться OB.
- 2. Разработка методики совместного облучения ОВ и волоконных датчиков на реакторе ИВГ.1М.
- 3. Исследование зависимости оптических потерь OB с различными покрытиями от температуры.
- 4. Исследование РИП на длине волны 1,55 мкм в процессе и после реакторного облучения.
- 5. Исследование спектров РИП в диапазоне длин волн 1,1-1,7 мкм в процессе и после реакторного облучения.
- 6. Исследование РИЛ.

6

**Объект исследования:** радиационно-стойкие одномодовые волоконные световоды 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 производства FORC-Photonics.

**Предмет исследования:** радиационная стойкость волоконных световодов и датчиков температуры и деформации на основе волоконных брэгговских решеток при совместном воздействии смешанного гамма-нейтронного облучения, температуры и вакуума.

## Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые было исследовано РИП одномодовых ОВ с нелегированной сердцевиной и фторированной светоотражающей оболочкой в различных защитных покрытиях (полиимид, алюминий, медь), при смешанном гамманейтронном облучении на длине волны 1,55 мкм при потоке быстрых нейтронов (E>0,1 MэB) 2,39·10<sup>13</sup> н/(см<sup>2</sup>·с), мощности дозы γ-излучения 1570 Гр/с и контролируемом изменении температуры от 150 до 350 °C.
- Впервые было установлено, что кроме радиационно-индуцированного поглощения при реакторном облучении при повышенной температуре вклад в наведенные потери могут давать микроизгибные оптические потери металлического покрытия.
- 3. Впервые при смешанном гамма-нейтронном облучении было исследовано РИП ОВ с полой сердцевиной револьверного типа и была показана перспективность использования данного типа ОВ в качестве внутриреакторных, обладающих практически нулевым РИП на длине волны 1,55 мкм.

### Теоретическая и практическая ценность работы заключается в следующем:

- Смоделировано и разработано облучательное ампульное устройство (АУ) для реактора ИВГ.1М, позволяющее проводить совместные исследования радиационной стойкости волоконных ОВ и датчиков температуры и деформации на основе волоконных брэгговских решеток в процессе и после смешанного гамма-нейтронного облучения при контролируемом изменении температуры и давления в АУ.
- Разработаны методики по совместному облучению на реакторе ИВГ.1М и исследованию основных параметров волоконных ОВ и датчиков на основе ВБР. Данные методики также могут применяться для исследования радиационной стойкости ОВ и датчиков на других исследовательских реакторах.
- 3. Полученные результаты позволят глубже понять физическую природу процессов происходящих в ОВ и датчиках на основе ВБР в условиях совместного влияния реакторного облучения, высокой температуры и вакуума на их рабочие параметры и радиационную стойкость.

**Методология и методы исследования.** Для достижения поставленной цели применялась разработанная, в рамках данной работы, методика проведения реакторных испытаний радиационно-стойких ОВ и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с in-situ контролем.

#### Защищаемые положения

- Длинноволновое радиационно-индуцированное поглощение (λ≥1,5 мкм) зависит от температуры. Увеличении температуры от 200 до 350 °C снижает РИП на ~30 % при поглощенной дозе γ-излучения 2,8·10<sup>7</sup> Гр и флюенсе быстрых нейтронов (E>0,1 МэВ) 4,4·10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup>.
- На длине волны 1,55 мкм РИП света в одномодовых ОВ с нелегированной сердцевиной из чистого кварцевого стекла при поглощенной дозе γ-излучения 2,8·10<sup>7</sup> Гр и флюенсе быстрых нейтронов (E>0,1 МэВ) 4,4 10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup> при температуре облучения 150-350 °C не превышает интервал 0,12-

0,16 дБ/м, что говорит о возможности их применения в ядерных и термоядерных установках.

- Наличие вакуума при реакторном облучении ОВ приводит к отсутствию диффузии водорода в сердцевину световода и, как следствие, к отсутствию возрастания полосы поглощения гидроксильных групп на длине волны 1,38 мкм.
- В ближнем ИК-диапазоне на длинах волн 0,8-1,7 мкм при реакторном облучении нет паразитного вклада радиационно-индуцированной люминесценции на детектируемом уровне сигнала - 60 дБм.

## Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и двух приложений.

<u>Во введении</u> обоснована актуальность диссертационной работы, определена цель и соответствующие ей задачи исследований, а также, кратко изложено содержание диссертации по главам.

<u>В первой главе</u> представлен литературный обзор по теме диссертационной работы и постановка задачи исследований. Обобщены работы по исследованию радиационно-индуцированного поглощения в оптических волокнах на основе кварцевого стекла при смешанном гамма-нейтронном реакторном облучении.

Во второй главе описаны основные свойства исследуемых оптических волокон. Представлено описание и основные особенности реактора ИВГ.1М, а также экспериментальных установок для исследования РИП на фиксированной длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм и спектров в интервале длин волн 1,1-1,7 мкм

<u>В третьей главе</u> приведено описание и адаптирование оптических волоконных световодов (OB) и датчиков температуры на основе волоконных брэгговских решеток (BБР), а также экспериментально-измерительного оборудования для проведения облучательных испытаний на реакторе ИВГ.1М. Приведено описание и различные этапы сборки конструкции экспериментального устройства (AУ). В ходе выполнения данной работы были проведены нейтроннофизический расчет с использованием расчетного кода MCNP6 и теплофизический расчет с использованием программного комплекса ANSYS.

<u>В четверной главе</u> представлены результаты предреакторных исследований температурно-индуцированных оптических потерь и определен их уровень для металлопокрытых OB в температурном диапазоне 25-400 °C. Описаны результаты сравнительного исследования РИП в пяти номинально радиационностойких одномодовых OB и в OB с полой сердцевиной различных производителей на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм в условиях реакторного облучения при максимальном флюенсе быстрых нейтронов (E>0,1 эВ) 4,46·10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup>; и поглощенной дозе 2,91·10<sup>7</sup> Гр. После облучения РИП на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм составляло 0,12-0,16 дБ/м без учета микроизгибных потерь. Достигнутый уровень РИП более чем на порядок ниже, чем в известных литературных источниках, что вероятно связано с существенно более высокой температурой в нашем эксперименте и/или более высокой радиационной стойкостью исследуемых OB. Также, помимо OB с сердцевиной из чистого кварцевого стекла, исследовалось OB револьверного типа с полой сердцевиной, который представляется многообещающим в качестве внутриреакторного транспортного волокна.

Кроме того, представлены исследования спектров РНП в спектральном диапазоне 1,1-1,7 мкм. Установлено отсутствие возрастание полосы поглощения гидроксильных групп на длине волны 1,38 мкм из-за отсутствия диффузии атомов водорода в сердцевину OB.

<u>В заключении</u> сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается: корректностью и полнотой решаемых задач, использованием современных апробированных методов экспериментальных исследований, объемом и качеством полученных экспериментальных данных, хорошо согласующихся с имеющимися данными литературных источников, апробацией полученных результатов и выводов на международных научных конференциях, а также публикацией в журналах рекомендованных ВАК РФ и изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

## Публикации и апробация работы

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, прошли апробацию на трех международных конференциях, включая доклады подготовленные совместно с руководителем:

1. Гныря В.С., Гордиенко Ю.Н., Кульсартов Т.В., Самарханов К.К., Тюрин Ю.И., Кашайкин П.Ф., Брицкий В.А. Радиационно-индуцированное поглощение света в оптических волоконных световодах при реакторном облучении в вакууме // Сборник тезисов IX Международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала, Курчатов, 7-9 сент. 2021 г.». – 2021 г., Курчатов, РГП НЯЦ РК. – С.71.

2. Gnyrya V.S., Samarkhanov K.K., Tyurin Yu.I., Kashaikyn P.F., Britskiy V.A., Gordienko Yu.N., Kulsartov T.V., Ponkratov Yu.V., Bochkov V.S. A technique for conducting of reactor in-situ tests of optical fibres and FBG-sensors intended for in-vessel applications in thermonuclear facilities // Book of Abstracts of the 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT 2022). – 18–23 September, Dubrovnik, Croatia. – P.652.

Кроме того, результаты неоднократно докладывались на научных семинарах. Результаты работы вошли в отчет для ИТЭР «Исполнительное соглашение №1 к договору о сотрудничестве между РГП НЯЦ РК и ИТЭР».

На ампульное устройство, применявшееся для проведения экспериментов, имеется:

1. Патент РК № 4919 от 30.04.2020; Гныря Вячеслав Сергеевич, Понкратов Юрий Валентинович, Скаков Мажын Канапинович, Барсуков Николай Иванович, Гордиенко Юрий Николаевич, Заурбекова Жанна Асхатовна, Карамбаева Индира Сергазыевна.

Основные результаты диссертационной работы представлены в пяти публикациях, из них четыре – в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, одна – в журнале, рекомендованном ВАК:

1. Gnyrya V.S., Tyurin Yu.I., Kashaykin P.F., Kulsartov T.V., Kenzhina I.E., Zaurbekova Zh.A., Samarkhanov K.K., Gordienko Yu.N., Ponkratov Yu.V., Askerbekov S.K., Tolenova A.U., Shaimerdenov A.A. A technique for conducting of reactor in-situ tests of optical fibres and FBG-sensors intended for in-vessel applications in thermonuclear facilities // Fusion Engineering and Design 191 (2023) 113787 https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113787.

2. Gnyrya V., Gordienko Yu., Surayev A., Baklanova Yu., Vityuk G.A. et al. Experimental device design justification for radiation resistance tests of single-mode optical fibers and FBG-based sensors at the IVG.1M reactor // Journal of Physics: Conference Series 2155. – 2022. – 012019. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2155/1/012019 (Scopus – 18%, Q4, CiteScore –0,8).

3. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Vasiliev S.A., Britskiy V.A., Ignatyev A.D., Ponkratov Y.V., Kulsartov T.V., Samarkhanov K.K., Gnyrya V.S., Zarenbin A.V., Semjonov S.L. Radiation Resistance of Single-Mode Optical Fibers at  $\lambda = 1.55$  µm under Irradiation at IVG.1M Nuclear Reactor // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2020. Vol.67. Issue 10. # 9177171. P. 2162-2171 DOI 10.1109/TNS.2020.3019404 (БД WoS: IF=1,679, Q2 в категории Nuclear Science & Тесhnology; БД Scopus: SJR=0,537, наивысший процентиль 76 по CiteScore в категории Nuclear Energy and Engineering).

4. Irkimbekov R.A., Zhagiparova L.K., Kotov V.M., Vurim A.D., Gnyrya V.S. Neutronics Model of the IVG.1M Reactor: Development and Critical-State Verification // Atomic Energy.- 2019.- Vol.- 127.- Issue 2.- P. 69–76. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-019-00587-1 (IF = 0,302, БД WoS).

5. Жагипарова Л.К., Иркимбеков Р.А., Котов В.М., Вурим А.Д., Гныря В.С. Нейтронно-физическая модель реактора ИВГ.1М: разработка и верификация по критическому состоянию // Атомная энергия. – 2019.– Т.127.– Ном.2(8).– С.63-68. (IF = 0,610).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач исследования (совместно с научным руководителем); проведении экспериментальных исследований влияния облучения гамма-квантами и быстрыми нейтронами на стойкость светодиодов к воздействию эксплуатационных факторов с соавторами при непосредственном участии; обработке результатов экспериментов; формулировании выводов и положений, выносимых на защиту; написание статей совместно с соавторами при непосредственном участии; подготовке докладов и выступлениях на семинарах и конференциях.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Международного проекта термоядерного реактора ИТЭР («Исполнительное соглашение №1 к договору о сотрудничестве между РГП НЯЦ РК и ИТЭР»).

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии, приложений. Общий объем диссертации составляет 108 страниц. Работа содержит 4 таблицы, 51 рисунок. Библиография включает в себя 71 наименование.

## ГЛАВА 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ СМЕШАННОГО ГАММА-НЕЙТРОННОГО РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА КВАРЦЕВОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ)

В данной главе приведено краткое знакомство с объектом исследования – оптическим волокном (OB, либо просто «оптоволокно») и его основными свойствами. Также здесь приведены основные сведения об известных, на момент написания данной работы, механизмах радиационно-индуцированного поглощения (РИП) света, радиационно-индуцированной люминесценции (РИЛ) света и радиационного изменения показателя преломления (РИПП) в ОВ на основе кварцевого стекла под действием реакторного облучения. Рассмотрены немногочисленные работы по исследованию оптических свойств ОВ в ближнем ИК-диапазоне в процессе реакторного облучения.

## 1.1. Структура, основные типы и свойства оптического волокна

Оптическое волокно (OB) представляет собой диэлектрический волновод электромагнитного излучения, который обеспечивает надежную и быструю передачу информации на огромные расстояния [35-37]. Передаваемые сигналы обычно находятся в ближней инфракрасной (ИК) области спектра в телекоммуникационных окнах на длинах волн 0,85, 1,31 или 1,55 мкм. В ультрафиолетовой и видимой области спектра OB также используются, но больше для специальных научно-технических применений. Простейшая структура OB показана на рисунке 1.1. Центральная часть OB называется сердцевиной и представляет собой оптическую среду, характеризующуюся показателем преломления n<sub>1</sub>. Промежуточная часть называется оболочкой и характеризуется показателем преломления n<sub>2</sub>. Внешняя часть представляет собой так называемое покрытие (обычно полимер), которое представляет собой защитный слой, наносимый на OB для улучшения его механических свойств. Для специальных применений, в том числе и для реакторных, может применяться как металлические защитные покрытия, например из меди или алюминия [38-41], так и покрытия из органических соединений, например акрилатные или полиимидные.



Рисунок 1.1 – Структура оптического волокна

Свет в сердцевине OB распространяется при условии его полного внутреннего отражения (ПВО), т.е. при условии что показатель преломления сердцевины больше показателя преломления оболочки (n<sub>1</sub>>n<sub>2</sub>). В OB на основе диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) изменение показателя преломления сердцевины или оболочки достигается путем изменения их химического состава. На рисунке 1.2 представлены основные легирующие добавки, меняющие показатель преломления кварцевого стекла. Для стандартных телекоммуникационных OB наиболее распространённой добавкой для повышения показателя преломления кварцевой сердцевины является диоксид германия GeO<sub>2</sub>. Также возможно создание световодной структуры путем снижения показателя преломления светоотражающей оболочки путем её легирования фтором или бором (рисунок 1.2). В основном такого типа OB (OB с нелегированной сердцевиной из чистого кварцевого стекла и с оболочкой, легированной фтором) и были выбраны в данной работе в качестве объекта исследования.



Рисунок 1.2 – Зависимости показателя преломления кварцевого стекла от концентрации легирующих компонентов. Взято из [41]

Свойства распространения света OB зависят от профиля показателя преломления и могут быть получены путем решения волнового уравнения для электромагнитного поля [37]. Решения выражаются через так называемые волноводные моды, которые представляют собой пространственные конфигурации электромагнитного поля, которые сохраняют форму в процессе распространения по OB. Конструкция волокна (радиус, профиль показателя преломления) и рабочая длина волны определяют количество и характеристики распространяющихся мод в OB. Таким образом, OB по способу распространения света делятся на многомодовые и одномодовые:

- одномодовые («single mode» – SM) – это OB, в которых на рабочей длине волны распространяется только одна мода, которая называется фундаментальной. Типичные одномодовые OB, работают в ближнем ИК-диапазоне, имеют диаметр сердцевин около 8-10 мкм и небольшую разницу показателей преломления между сердцевиной и оболочкой (~ 0,3%).

- многомодовые («multi-mode» – MM) – это ОВ поддерживающие распространение множества мод. Многомодовые ОВ, работающие в ближнем ИК-

16

диапазоне, имеют бо́льшие диаметры сердцевины (>40 мкм) и бо́льшую разницу в показателях преломления сердцевины и оболочки.

В данной работе в качестве **объекта исследования** были выбраны одномодовые OB с сердцевиной из чистого кварцевого стекла и светоотражающей оболочкой, легированной фтором. Данный тип был выбран, как один из наиболее радиационно-стойких в ближнем ИК-диапазоне [43-45].



Рисунок 1.3 – Типичный спектр начальных потерь OB на основе кварцевого стекла. Взято из [37]

Одним из основных характеристик ОВ являются начальные оптические потери. На рисунке 1.3 представлен типичный спектр оптических потерь для ОВ на основе SiO<sub>2</sub>. Оптические потери в ближнем ИК-диапазоне обусловлены вкладом нескольких компонент, таких как:

рэлеевское рассеяние, которое возникает из-за микроскопических изменений плотности материала и зависит от длины волны как 1/λ<sup>4</sup>;

- хвост инфракрасного поглощения, возникающий из-за колебательного поглощения связей Si-O;

- ультрафиолетовый (УФ) хвост, который возникает в результате поглощения света, связанного с электронными переходами в ультрафиолетовой области спектра;

- поглощение гидроксильными группами (OH-группы), на длинах волн λ=2,73, 1,38 и 0,95 мкм.

При воздействии на OB ионизирующего излучения, кроме описанных выше компонентов, добавляется еще радиационно-индуцированные потери, более подробно о которых речь пойдет в следующих разделах.

Еще одной важной характеристикой одномодового OB является длина волны отсечки первой высшей моды. Под длиной волны отсечки (cutoff wavelenght) понимают минимальную длину волны, при которой волокно поддерживает только одну распространяемую моду [37]. То есть одно и тоже OB может быть как одномодовым, так и многомодовым, в зависимости от длины волны, на которой оно работает.

# 1.2. Механизмы взаимодействия ионизирующего излучения с материалом OB при реакторном облучении

В процессе реакторного облучения происходит взаимодействие ионизирующего гамма-излучения и нейтронов с материалом оптического волокна, в результате которого образуются структурные дефекты, негативно влияющие на рабочие характеристики ОВ как оптические, так и механические.

Дефекты в кварцевом стекле образуются по двум основным механизмам. К первому относится разрушение химических связей при воздействии ионизирующего излучения и, как следствие, образование дефектов типа «разрыва химических связей». Например, при разрушении регулярной связи в кварцевом стекле Si-O появляется немостиковый кислород и трехкординированный кремний.

На рисунке 1.4 представлены основные механизмы взаимодействия гаммаизлучения с кварцевым стеклом. Как видно, при различной энергии гаммаквантов возможны различные механизмы их взаимодействия с веществом. При энергии 10<sup>2</sup>-10<sup>5</sup> эВ превалирующим является фотоэффект, при энергии в диапазоне 10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> эВ основным механизмом взаимодействия является комптоновское рассеяние гамма квантов на электронах, а при энергии 10<sup>7</sup>-10<sup>9</sup> эВ на первый план начинает выходить образование электрон-позитронных пар при взаимодействии уже не с электронами атома, а с их ядрами [46].



Рисунок 1.4 – Механизмы взаимодействия ионизирующего и ядерного излучения с кварцевым стеклом. Взято из [46]

В результате всех трех видов взаимодействия появляются вторичные электроны, которые обладают достаточной энергией для последующей ионизации атомов и появлению третичных электронов. Так происходит пока энергия образовавшихся электронов достигает такого значения, что возбуждаются только валентные электроны с внешних оболочек. Это, в свою очередь, приводит к возникновению электронно-дырочных пар, захват (локализация) которых ведет к возникновению радиационных центров окраски (РЦО) [47].

Ко второму механизму относится смещение атомов при упругих столкновениях с бомбардирующими частицами [48, 49]. При условии, что энергия, передаваемая налетающей частицей, больше энергии связей атома в веществе, происходит его смещение. В этом случае могут образовываться междоузельные атомы или молекулы.

Механизмы взаимодействия ионизирующего и ядерного излучения с кварцевым стеклом более подробно описаны в обзорной классической статье Д. Грискома [49] и суммарно представлены на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Схема взаимодействия различный типов ионизирующего излучения с кварцевым стеклом [49]

Еще одним механизмом взаимодействие нейтронного облучения с кварцевым стеклом являются ядерный превращения. Так, например, при взаимодействии тепловых нейтронов с атомом кремния <sup>14</sup>Si<sup>30</sup> происходит его ядерное превращение в фосфор <sup>15</sup>P<sup>31</sup> [28] по реакции (1.1):

$${}_{14}\text{Si}^{30} + n = {}_{14}\text{Si}^{31} - \beta^{-}(2.62 \text{ h}) \rightarrow {}_{15}\text{P}^{31}$$
 (1.1)

Наличие добавки фосфора в кварцевом стекле может в значительной степени снизить его радиационную стойкость в ближнем ИК-диапазоне из-за радиационно-индуцированного  $P_1$ -центра, имеющего полосу поглощения с максимумом на длине волны  $\lambda$ =1,6 мкм [13, 50, 51]. Более того, фосфоросиликатные ОВ являются наиболее радиационно-восприимчивыми и могут применяться в качестве чувствительных элементов в оптоволоконных дозиметрах [50,51].

Однако, ядерные превращения кремния Si<sup>30</sup> в фосфор P<sup>31</sup>, по некоторым оценкам [28], составляют менее 0,1 ppm после 100 часов облучения при потоке тепловых нейтронов 10<sup>14</sup> н/(см<sup>2</sup>·с). Таким образом, этот эффект можно считать не столь значительным по сравнению с образованием РЦО по механизмам, описанным выше.

1.3. Радиационно-индуцированное поглощение (РИП) света в оптических волокнах на основе кварцевого стекла при реакторном облучении

Как было отмечено в предыдущем разделе, при взаимодействии смешанного гамма-нейтронного облучения в материале ОВ происходит образование структурных дефектов. В случае поглощения данными дефектами светового сигнала, который распространяющийся по ОВ говорят, что возникает радиационноиндуцированное поглощение (РИП) света. Оптически активные структурные дефекты при этом называют радиационные центры окраски (РЦО).

Из ряда обзорных статей [13, 49, 52-55] можно выявить множество РЦО в кварцевом стекле, которые ограничивают оптическую радиационную стойкость ОВ на его основе. На рисунке 1.6 представлены основные РЦО в кварцевом стекле и спектральные интервалы, в которых находятся их полосы поглощения.



Рисунок 1.6 – Основные РЦО и их полосы поглощения в интервале прозрачности кварцевого стекла. Взято из [55]

Стоит отметить, что большинство полос поглощения РЦО в кварцевом стекле находится в видимом и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах (рисунок1.6). РИП таких РЦО, как немостиковый кислород (NBOHC- non bridging oxygen hole center) или междуузельной молекулы Cl<sub>2</sub> (рисунок 1.6) могут значительно влиять на радиационную стойкость многомодовых OB, которые используются для диагностики плазмы в термоядерных реакторах в видимом диапазоне [56,57]. Однако, одномодовые OB преимущественно используются в ближнем ИК-диапазоне в телекоммуникационных окнах на длинах волн 1,31-1,55 мкм. В этом диапазоне РИП обусловлено коротковолновым «крылом» в который дают вклад все РЦО, полосы поглощения которых находятся в видимом и УФ-диапазонах. В процессе реакторного облучения при высоких дозах облучения в ближнем ИКдиапазоне кроме коротковолнового крыла появляется длинноволновое РИП, которое становится преобладающим механизмом РИП (рисунок 1.7). И, если с коротковолновым РИП имеется некая определенность, т.е. известны основные РЦО, которые его составляют, механизмы образования и их основные свойства, то с длинноволновым поглощением дела обстоят гораздо сложнее.





На рисунке 1.7, взятого из работы [24], представлены спектры полных оптических потерь в процессе реакторного облучения при потоке быстрых нейтронов (E>0.1 МэВ)  $\Phi$ =10<sup>14</sup> н/(см<sup>2</sup>·с). Из спектров видно, что минимум РИП находится в интервале 0,8-1,0 мкм (рисунок 1.7), а на длинах волн 1,31-1,55 мкм РИП практически полностью обусловлено длинноволновым РИП, которое монотонно возрастает с поглощенной дозой.

В научной литературе существуют две основные теории о физической природе длинноволного РИП. Первая гипотеза [58] была высказана в конце 1990-х и заключается в том, что длинноволновое РИП обусловлено изменениями колебательных спектров сетки стекла из-за возникновения структурных дефектов типа трехкоординированного атома кремния при разрыве регулярных связей Si-O. Однако, в этом случае РИП должно было бы бесструктурно расти с увеличением длины волны как минимум до 2,8 мкм, где находится полоса поглощения гидроксильных групп. Однако последующие работы показали, что полоса поглощения длинноволнового РИП достигает максимума в области 1,8-2,2 мкм, при этом форма полосы очень похожа на «LTIRA» («Low Temperature Infra-Red Absorption» – низкотемпературное длинноволновое поглощение самозахваченных дырок на немостиковой р-орбитали атома кислорода с максимумом полосы поглощения на длине волны  $\lambda \sim 1,7-1,8$  мкм [59], которая образуется при низких температурах при ионизирующем облучении). На основании этого наблюдения и схожести поведения этих полос при термическом распаде (смещение их максимумов в сторону коротких волн при релаксации после облучения) в ряде работ было высказано предположение, что данное длинноволновое РИП обусловлено также поглощением самозахваченных дырок [60-62]. Однако известно, что самозахваченные дырки обладают крайне малой термостабильностью, а длинноволновое поглощение является высокостабильным при комнатной температуре.

В недавней работе [63] было высказано предположение, что длинноволновое поглощения является результатом роста полосы поглощения гидроксильных групп с максимумом на длине волны 2,8 мкм. Однако, тогда в этом случае РИП должно было бы также не иметь максимума в области 1,8-2,2 мкм.

Стоит еще раз стоит отметить ограниченное число работ, посвященных исследованию РИП в кварцевых ОВ при реакторном облучении в ближнем ИКдиапазоне. Большинство работ посвящено радиационным эффектам в многомодовых ОВ, и в научной литературе практически отсутствуют сведения об РИП на длине волны 1,55 мкм для стандартных одномодовых ОВ. Конечно, естественно предположить, что механизмы РИП в одномодовых и многомодовых ОВ будут аналогичны при условии схожести их химических составов, тем не менее, точные значения РИП являются необходимыми для дальнейшего использования ОВ в качестве транспортных для датчиков на основе ВБР, работающих в ближнем ИК-диапазоне. Поэтому более подробно рассмотрим основные работы, посвященные исследованию РИП в кварцевых ОВ (как одномодовых, так и многомодовых) при реакторном облучении.

В работе [25] были проведены исследования спектров РИП в трех видах многомодовых ОВ с различным содержанием ОН-групп и фтора в сердцевине при флюенсе быстрых нейтронов до  $\Phi \sim 2 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup> и дозе гамма-излучения D<sub>γ</sub>  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  Гр при температуре от 300 до 700 К. Было показано, что легирование сердцевины ОВ 1.6 вес.% фтора приводит к значительному понижению РИП более чем на порядок в спектральном диапазоне 0,8-1,5 мкм. Было обнаружено, что в спектральном диапазоне  $\lambda$ >1 мкм наведенные оптические потери в основном обусловлены длинноволновым поглощением (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Спектры РИП для ОВ легированного фтором и ОВ, с высоким содержанием ОН-групп при реакторном облучении до флюенса быстрых нейтронов до Φ ~2·10<sup>20</sup> н/см<sup>2</sup> и дозы гамма-излучения D<sub>γ</sub> ~ 5·10<sup>10</sup> Гр при температуре от 300 до 700 К. Взято из работы [25]

В работе [26] исследовали спектры РИП в многомодовых ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла с высоким (800-900 ppm) и низким (<0,2 ppm) содержанием ОН-групп в сердцевине при облучении быстрыми нейтронами до  $\Phi \sim 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>, при этом γ-доза составляла Dγ ~ 1 ГГр и температура облучения 270-300 °C. Несмотря на разницу в содержании гидроксильных групп, оба исследуемых ОВ продемонстрировали примерно одинаковое РИП в ~ 2 дБ/м на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм, обусловленное длинноволновым поглощением, как и в предыдущем исследовании [25].

В исследовании [27] авторы сравнивали спектры РИП в двух одинаковых многомодовых OB, различающихся только типом покрытия: полимер или алюминий. Максимальный флюенс быстрых нейтронов был выше  $\Phi = 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>, а  $\gamma$ доза – более  $2 \cdot 10^9$  Гр, при этом температура была ~ 50 °C. Оказалось, что в OB в полимерном покрытии в процессе облучения происходит рост полосы поглощения OH-групп с максимумом на длине волны  $\lambda = 1,38$  мкм. Этот эффект не наблюдался в OB с алюминиевым покрытием, поэтому авторы объяснили его как сдвиг протонов с последующей их диффузией из полимерного покрытия в сердцевину. Интересно, что несмотря на разницу в эффекте роста OH-групп в OB с полимерным покрытием, оба OB продемонстрировали примерно одинаковое РИП на длине волны 1,55 мкм ~ 2-3 дБ/м при  $\Phi \sim 6 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> и  $\gamma$ -дозе 1,5  $\cdot 10^8$  Гр.



Рисунок 1.9 – Спектры РИП ОВ в полимерном и алюминиевом покрытиях при реакторном облучении до флюенса Φ =10<sup>19</sup> н/см<sup>2</sup>, γ-дозе более 2·10<sup>9</sup> Гр и температуре ~50 °C. Взято из работы [28]

В работе [28] авторы продолжили исследование роста поглощения OHгруппы при реакторном облучении в многомодовых OB с большой сердцевиной. OB облучали до флюенса быстрых нейтронов от  $10^{17}$  до  $10^{19}$  н/см<sup>2</sup>, при этом поглощенная  $\gamma$ -доза увеличивалась соответственно. Было показано, что увеличение флюенса быстрых нейтронов и дозы от  $\Phi \sim 55, 2 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> и D $\gamma \sim 283$  МГр до  $\Phi \sim 1,24 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> и D $\gamma \sim 637$  МГр, соответственно, привело к увеличению РИП на длине волны 1,55 мкм от  $\sim 3$  до  $\sim 5$  дБ/м, при температуре облучения 130-290 °C. В данной работе было выдвинуто предположение, что происходит диффузия атомарного водорода из полимерного покрытия в сердцевину.

В работе [24] исследовали РИП в многочисленных многомодовых, одномодовых и фотонно-кристаллическом ОВ в процессе облучения флюенсом быстрых нейтронов  $\Phi \sim 10^{20}$  н/см<sup>2</sup> и  $\gamma$ -дозой 16 ГГр. В данной работе в отличии от предыдущих [14-17] было исследовано РИП в одномодовых ОВ, но только на длине волны 1,064 мкм (рисунок 1.10), однако, в этой области, как известно (рисунок 1.7), РИП достигает минимальных значений и далее с увеличением длины волны происходит его рост. На интересующей нас длине волны 1,55 мкм РИП в многомодовом ОВ с чисто кварцевой сердцевиной составляло ~ 5 дБ на 50 см при флюенсе быстрых нейтронов  $\Phi = 1,8 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup> и γ-дозе 0,21 ГГр (рисунок 1.7). В данной работе примечательным является демонстрация практически нулевого РИП для фотонно-кристаллического ОВ (рисунок 1.10, образец «ВІ1»), в котором свет распространяется по воздушной сердцевине, в отличие от стандартных ОВ, структура которых описана в разделе 1.1.



Рисунок 1.10 – Зависимость РИП на длинах волн 0,98 и 1,064 мкм для различного типа ОВ при реакторном облучении до флюенса быстрых нейтронов Φ ~ 10<sup>20</sup> н/см<sup>2</sup> и γ-дозы 16 ГГр. Взято из работы [24]

Исследования, проведенные в работе [19] были посвящены РИП в многомодовом ОВ с градиентным профилем показателя преломления, легированным фтором. Акцент в данной работе был поставлен на изучение коротковолновых РЦО, с полосами поглощения лежащих на длинах волн короче ~ 0,8 мкм. Спектры РИП, полученные через месяц после реакторного облучения до флюенса быстрых нейтронов  $\Phi = 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> сравнивались со спектрами  $\gamma$ -облучённых до дозы 10 МГр ОВ. При этом спектры ОВ при реакторном и гамма-облучении оказались достаточно схожи по форме и отличались только количественно. Интересно, что на длине волны 1,55 мкм РИП составляющая всего ~ 0,1 дБ/м через месяц после облучения в реакторе. Это более чем на порядок меньше, чем в предыдущих рассмотренных работах. По-видимому, термический распад РЦО в течение месяца релаксации даже при комнатной температуре может снизить РИП на 1,55 мкм. Как и в предыдущих работах основным источником РИП на 1,55 мкм являлось длинноволновое поглощение.

Отдельно отметим работу [64] в которой облучались коммерчески доступные многомодовые OB в полиимидном покрытии с высоким и низким содержанием OH-групп в сердцевине. Облучение проводилось при относительно невысоком потоке нейтронов  $10^8$  н/(см<sup>2</sup>с) и до флюенса  $4,5 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>. Интересным в данной работе являлось контролируемое регулирование температуры OB в процессе реакторного облучения от 200 до 1000 °C. В OB с малым количеством OHгрупп основным механизмом РИП при реакторном облучении совместно с повышенной температурой явилось повышение полосы поглощения OH-групп с максимумом на длине волны 1,38 мкм.



Рисунок 1.11 – Спектры РИП при реакторном облучении при потоке нейтронов 10<sup>8</sup> н/(см<sup>2</sup>с), до флюенса 4,5·10<sup>15</sup> н/см<sup>2</sup> при вариации температуры от 200 до 1000 °С. Взято из работы [64]

Таким образом из рассмотренных работ можно заключить, что РИП на длине волны 1,55 мкм при реакторном облучении в основном обусловлено длинноволновым поглощением. Свойства данного длинноволнового РИП, как и его физическая природа, до сих пор являются открытым вопросом в мировой научной литературе. Стоит также отметить отсутствие данных по РИП для одномодовых ОВ на длине волны 1,55 мкм на которой работают большинство датчиков на основе ВБР. Также отсутствуют исследования РИП в ОВ в процессе реакторного облучения в вакууме, т.е. в условиях близких к использованию ОВ в ИТЭР.

1.4. Радиационно-индуцированная люминесценция (РИЛ) света в оптическом волокне на основе кварцевого стекла

Радиационно-индуцированной люминесценцией (РИЛ) называется излучение света в материале под действием ионизирующего излучение. В кварцевом стекле РИЛ может быть обусловлена свечением уже существующих или радиационно-индуцированных центров окраски. Помимо этого, процессом сопутствующим РИЛ, может проявляться свечение Вавилова-Черенкова (далее черенковское излучение). На рисунке 1.12 из обзора [13] представлено изменение сигнала, вызванное импульсным рентгеновским облучением с энергией 1 МэВ за время 35 нс для многомодового ОВ на длине волны 0,78 мкм.



Рисунок 1.12 – Зависимость пропускного сигнала при импульсном рентгеновским облучении с энергией 1 МэВ за время 35 нс для многомодового ОВ на длине волны λ=0,78 мкм. Взято из работы [13]

Во время импульса, по крайней мере, два конкурирующих процесса протекают в OB: радиационно-индуцированное поглощение, рассмотренное в предыдущем разделе, и радиационно-индуцированное свечение, которое в данном случае было вызвана черенковским излучением [13]. После окончания импульса доминантным является РИП (рисунок 1.12).

В случае смешанного гамма-нейтронного реакторного облучения в ОВ происходят аналогичные процессы.

Так в работе [25] была исследована РИЛ в трех многомодовых ОВ с сердцевиной из кварцевого стекла, содержащих различное количество фтора и ОНгрупп в сердцевине. Облучение проводилось до флюенса быстрых нейтронов  $\Phi \sim 10^{20}$  н/см<sup>2</sup> и поглощенной дозы D $\gamma \sim 4$  ГГр при температуре  $\sim 200$  °C. Было обнаружено, что РИЛ уменьшается с длиной волны и имеет два максимумама: один в видимой области на 0,45 мкм и другой на 1,27 мкм, за которым следуют провалы (рисунок 1.13). Первый провал в спектре РИЛ обусловлен поглощением немостикового кислорода на длине волны 0,63 мкм, а второй поглощением OHгрупп на длине волны 1,38 мкм. Монотонно убывающее с длиной волны слабое радиационно-индуцированное свечение наблюдалось также в области 1,5-1,7 мкм [26].



Рисунок 1.13 – Спектр люминесценции многомодового OB при реакторном облучении до флюенса быстрых нейтронов до Φ~10<sup>20</sup> н/см<sup>2</sup> и поглощенной дозы до Dγ ~ 4 ГГр при температуре ~ 200 °C. Взято из [26]

На рисунке 1.13 отчетливо видны оба механизма, описанные выше: монотонно спадающее с ростом длины волны свечение является черенковским излучением, а полоса на 1,27 мкм является люминесценцией радиационного центра окраски, по-видимому молекулы O<sub>2</sub>, которая выходит в междоузлье в сетке кварцевого стекла при ионизирующем облучении [52].

Исследования РИЛ в процессе реакторного облучения в одномодовых OB в ближнем ИК-диапазоне в литературе отсутствуют. Однако эти знания необходимы для применения данных OB в смешанных полях, т.к. вклад РИЛ на рабочей длине волны датчиков может привести к получению недостоверных значений.

1.5. Радиационно-индуцированное изменение показателя преломления (РИПП) под действием реакторного излучения

В процессе реакторного облучения при флюенсах больше 10<sup>18</sup> н/см<sup>2</sup>, происходит изменение микроструктуры кварцевого стекла, что приводит к изменению, в свою очередь, его оптических свойства, таких как, например, показатель преломления (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Изменение показателя преломления и плотности кварцевого стекла в процессе реакторного облучения. Взято из [13]

Изменение показателя преломления кварцевого стекла в процессе реакторного облучения может быть обусловлено изменением его плотности или из-за возникновения РЦО. Показатель преломления связан с плотностью кварцевого стекла формулой Лоренца-Лоренца (1.2), а вклад РЦО описывается через соотношение Крамерса-Кронига (1.3) [13, 28, 65]. Уплотнение или набухание, приводящее к изменениям плотности, зависит от формы, в которой находится диоксид кремния (кристаллический или аморфный). Этот эффект был впервые обнаружен в работе [65] в объемных образцах кварцевого стекла и кристаллического оксида кремния при облучении их быстрыми нейтронами.

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4}{3} \pi A \alpha_{2n} \qquad (1.2)$$

(N — число поляризующихся частиц в единице объёма). В случае смеси k вещества правая часть (\*) заменяется на сумму k членов

$$\frac{4}{3}$$
 AN<sub>i</sub>  $\alpha_{in}^{j}$ 

(i = 1, 2, ..., k), каждый из которых относится лишь к одному из этих веществ (сумма всех N<sub>i</sub> равна N).

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega),$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\omega$  – частота

$$arepsilon'(\omega) = 1 + rac{1}{\pi} v. \, p. \int\limits_{-\infty}^{\infty} rac{arepsilon''(x)}{x-\omega} dx \qquad (1.3)$$

$$arepsilon''(\omega)=-rac{1}{\pi}v.\,p.\int\limits_{-\infty}^{\infty}rac{arepsilon'(x)-1}{x-\omega}dx.$$

Было показано, что плотность и показатель преломления кварцевого стекла увеличиваются на ~ 3% при облучении. У кристаллического кварца, наоборот, при облучении происходит снижение плотности более чем на 10% (рисунок 1.14). Примечательно, что нейтронное облучение превращает аморфную и кристаллическую фазы кремнезема в новую общую топологическую структура упоминается как фаза метамикта [66]. Эта фаза является результатом радиационноиндуцированной потери дальней трансляционной периодичности и ориентационного порядка (т.е. потеря топологического порядка) [67]. Точная природа этой аморфной фазы все еще обсуждается, но ее происхождение связано с изменением тетраэдрической симметрии и изменением распределения звенности колец Si-O.

Радиационно-индуцированное изменение показателя преломления в кварцевом стекле влияет в конечном счете на оптические свойства OB, создавая дополнительные волноводные потери при воздействии высоких нейтронных флюенсов.

Таким образом, при анализе результатов при реакторном облучении OB на основе из кварцевого стекла до высоких флюенсов (<10<sup>18</sup> н/см<sup>2</sup>) необходимо учитывать дополнительные потери, которые могут возникнуть из-за полноводных эффектов, связанных с изменением показателя преломления кварцевого стекла.

#### 1.6. Выводы по главе 1

В данной главе были рассмотрены основные свойства OB и механизмы взаимодействия смешанного гамма-нейтронного облучения с кварцевым стеклом.

Из анализа литературных данных следует, что в процессе реакторного облучения в ОВ возникает три основных эффекта:

- 1. Радиационно-индицированное поглощение (РИП) света. Причиной РИП является образование радиационных центров окраски, поглощающих световой сигнал, который распространяется по OB.
- 2. Радиационно-индуцированная люминесценция (РИЛ), к которой, в свою очередь, добавляется вклад люминесценции существующих или

радиационно-индуцированных центров окраски и радиационно-индуцированного свечения, вызванного черенковским излучением.

 Радиационно-индуцированное изменение показателя преломления (РИПП), причиной которого в основном является изменение плотности кварцевого стекла при высоких флюенсах.

Среди этих явлений основным ограничивающий механизмов для интеграции ОВ в различные системы диагностики в ядерных и термоядерных установках является РИП.

На рабочей длине большинства современных оптоволоконных датчиков  $\lambda$ =1,55 мкм в процессе смешанного гамма-нейтронного облучения РИП в основном обусловлено длинноволновым поглощением. Свойства данного длинноволнового РИП, как и его физическая природа, до сих пор являются предметом дискуссий. Отсутствие данных РИП для одномодовых ОВ на длине волны 1,55 мкм приводит к ограничению их использования для внутриреакторных применений. К ограничению их использованию в термоядерных установках, таких как ИТЭР, приводит отсутствие исследований РИП в процессе реакторного облучения в вакууме.

Также отсутствуют исследования РИЛ в процессе реакторного облучения в одномодовых ОВ в ближнем ИК-диапазоне в литературе. Однако эти знания необходимы для применения данных ОВ в смешанных полях, т.к. вклад РИЛ на рабочей длине волны датчиков может привести к получению недостоверных значений.

Таким образом, литературный обзор полностью обосновывает поставленные цели и задачи диссертационного исследования, приведенные во введении и направленные на получение, с практической точки зрения, достоверных результатов РИП и РИЛ на длине волны 1,55 мкм для демонстрации возможности применения ОВ в ядерных и термоядерных установках в качестве транспортных. С фундаментальной точки зрения диссертационное исследование направлено на получение нового знания о механизмах образования и свойствах длинноволнового РИП.
### ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Характеристики исследуемых оптических волокон

Для исследования были выбраны радиационно-стойкие OB коммерчески доступные на момент начала диссертационной работы. Одним из важных критериев являлась работоспособность выбранных OB при высоких температурах вплоть до 350-400 °C для имитации их работы в различных ядерных и термоядерных установках. Поэтому были выбраны OB в высокотемпературном полиимидном и в металлическом (медном и алюминиевом) покрытиях (таблица 2.1). Также дополнительно исследовались два OB в акрилатном покрытии, применимость которого ограничена температурой до 100 °C (OB 6 и 7 в таблице 2.1). Этот выбор был обусловлен тем, что OB 6 в отличие от остальных содержал фтор в сердцевине, который, как было показано в литературном обзоре (см. работу [26]), может существенно снижать РИП. Однако компания-производитель «Draka» данное OB изготавливает его только со стандартным акрилатным покрытием.

Также дополнительно было исследовано OB 7 с воздушной сердцевиной [68] (таблица 2.1) в акрилатном покрытии, отличающееся кардинально по принципу распространения света и по структуре от стандартных OB 1-6. Данный тип OB является перспективным для применений в сильных радиационных полях.

Основные характеристики исследуемых ОВ представлены в таблице 2.1.

N⁰	Произво-	Материал	Толщина	Толщина		Длина	Оптиче-	Назва-
	дитель	покрытия	покрытия,	фториро-	$\Delta n$	волны от-	ские по-	ние
			МКМ	ванной		сечки,	тери на	OB
				оболочки,		МКМ	1,55 мкм,	
				МКМ			дБ/км	
1	ПНППК	полиимид	15	29	0,0090	1,45	0,4	Pol-1
2	ПНППК –	алюминий	13	29	0,0090	1,45	7,0	Al
	НЦВО							
	РАН							
3	НЦВО	Медь	20	28	0,0092	1,44	9,0	Cu-1
	РАН							
4	IVG	угле-	20	20	0,0094	1,18	5,0	Cu-2
		род+медь						
5	iXblue	полиимид	15	34	~0,009	1,38	0,8	Pol-2
6	Draka	Акрилат	50					Acr
7	НЦВО	Акрилат	50	-	-	-	~50	НС
	РАН							

Таблица 2.1. – Основные характеристики исследуемых ОВ

Рассмотрим более подробно основные особенности исследуемых OB. На рисуеке 2.1 представлены фотографии всех типов OB с различными светоотражающими покрытиями.



Рисунок 2.1 – Фотографии ОВ в различных защитных покрытиях из полиимида, акрилата, алюминия и меди (слева направо)

## <u>OB-1 «Pol-1» (ПНППК), OB-2 «Al» (ПНППК-НЦВО РАН),</u> <u>OB-3 «Cu-1» (НЦВО РАН)</u>

Преформы для *OB 1-3* были изготовлены методом MCVD. В качестве опорной (внешней) трубы в MCVD-процессе использовали трубы F-300 фирмы Негаиs. Профили показателя преломления полученных преформ представлен на рисунок 2.2. Все преформы OB 1-3 имели *нелегированную сердцевину из SiO*<sub>2</sub> и светоотражающую оболочку, легированную фтором. При этом разница показателей преломления (ПП) сердцевины и оболочки достигала 0,009-0,0095 (рисунок 2.2). Преформа для *OB 1* и 2 была изготовлена в ПНППК, г. Пермь, а для *OB 3* в ИХВВ РАН, г. Нижний Новгород.



Рисунок 2.2 – Профиль показателя преломления (ПП) преформ для ОВ 1-3

*OB 1* и 2 были вытянуты из одной и той же преформы, вешний диаметр в обоих случаях составлял d=125 мкм. При этом на *OB 1* в процессе вытяжки происходило нанесение высокотемпературного полиимида. Вытяжка проводилась в ПНППК, г. Пермь.

*ОВ 2* вытягивалось из второй части преформы в алюминиевом защитном покрытии в НЦВО РАН, г. Москва

*OB 3* в медном защитном покрытии с внешним диаметром d=125 мкм вытягивался из другой преформы, профиль показателя преломления представлен на рисунок 2.2 Фотографии *OB 1-3* представлены на рисунке 2.1. На рисунке 2.3 представлены спектры начальных оптических потерь для *OB 1* и 2 в полиимидном м алюминиевом покрытиях.



Рисунок 2.3 – Спектры начальных оптических потерь для *OB 1 и 2*. Точки OTDR: оптические потери, измеренные методом обратной рефлектометрии [69]

На рабочей длине волны λ=1,55 мкм потери равны 0,3 и ~7 дБ/км для *OB 1* и 2 соответственно. Повышенный уровень оптических потерь *OB 2* связан с микроизгибными потерями, вносимыми алюминиевым покрытием.

Из рисунка 2.4 видно, что длины волн отсечек первой высшей моды *ОВ 1* и 2 отставляют ~1,47 мкм.



Рисунок 2.4 – Спектры начальных оптических потерь для ОВ 1 и 2

*OB-3* в медном покрытии имел начальные оптические потери на длине волны λ=1,55 мкм ~9 дБ/км, длина волны отсечки λ<sub>c</sub>=1,48 мкм.

Оптические потери для ОВ в металлическом покрытии были больше, чем в остальных из-за микроизгибных потерь, вносимыми алюминиевом и медным покрытиями [42]. Из ряда работ [38-40] известно, что микроизгибные оптические потери зависят от температуры. Так как предполагалось реакторное облучение при вариации температуры, то были также проведены предварительные лабораторные исследования по выявлению значений микроизгибных потерь при различных температурах. Эти исследования приведены в Главе 3.

### <u>OB-4 «Cu-2» (IVG)</u>

У фирмы «IVG» (Канада) было приобретено OB в медном защитном покрытии. OB имеет нелегированную сердцевину из SiO<sub>2</sub> и фторированную оболочку, аналогично *OB 1-3* (таблица 2.1). Профиль показателя преломления *OB 4* представлен на рисунке 2.5. На длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм начальные оптические потери *OB 4* равны 5 дБ/км, длина волны отсечки  $\lambda_c$ =1,18 мкм.



Рисунок 2.5 – Профиль показателя преломления OB-4 фирмы IVG

### OB-5 «Pol-2» (iXblue)

Компанией «iXblue» (Франция) было предоставлено ОВ в полиимидном покрытии, которое позиционируется как радиационно-стойкое. Сердцевина ОВ (обозначена «3» на рисунке 2.6) состояла из чистого кварцевого стекла, а светоотражающая оболочка (обозначена «2» на рисунке 2.6) была легировано фтором, как и в ОВ 1-4.

На рисунке 2.6 представлена фотография торца OB-4 фирмы iXblue. Отметим, что для OB 1-4 структуры аналогичные, разница только в геометрических размерах сердцевины и фторированной оболочки (таблица 2.1).



Рисунок 2.6 – Фотография торца OB-5 фирмы iXblue. «1» - соотвтетсвует материалу опорной трубы, на которую наносилась фторированная светоотражающая оболочка «2». «3» обозначает сердцевину OB

### OB-6 «Acr» (Draka)

От фирмы Draka было получено 300 м OB «Super RadHard single-mode fibre».

OB «Super RadHard single-mode fibre» фирмы Draka являются одними из наиболее радиационно-стойких коммерческих OB, представленных на рынке.

Главным отличием OB «*Super RadHard single-mode fibre»* фирмы Draka от остальных, представленных в таблице 2.1, является фторированная сердцевина. Начальные оптические потери на длине волны 1,55 мкм в данных OB не превышают 0,3 дБ/км, длина волны отсечки  $\lambda_c \leq 1,26$  мкм. Подробные характеристики OB «*Super RadHard single-mode fibre»* представлены на официальном сайте про-изводителя [70].

Еще раз отметить, что *OB* 6 имеет стандартное акрилатное покрытие, предназначенное для работы в условиях T<100 °C.

### <u>ОВ-7 «НС» (НЦВО РАН)</u>

OB-7 (Hollow core- HC) был изготовлен в НЦВО РАН. Преимуществом данного типа OB является то, что свет в нем распространяется по воздушной сердцевине и, следовательно, в ней не будет наведенных потерь, связанных с радиационными дефектами, возникающими в материале сердцевины обычного OB под действием ионизирующего излучения.

На рисунке 2.7 представлен спектр пропускания *OB-7* и фотография его торца, полученная на электронном микроскопе (в верхнем правом углу).

Отметим, что из-за особенности волноводных свойств данного типа OB их спектр пропускания имеет дискретный набор «окон прозрачности», положение которых зависит от геометрической структуры OB. Для нашего случая было выбрано OB имеющее такое окно в районе  $\lambda$ =1,55 мкм (рисунок 2.7). Оптические потери на длине волны 1,55 мкм порядка ~50 дБ/км, но несмотря на высокий уровень начальных потерь в нем ожидались РИП близкие к нулю.



Рисунок 2.7 – Спектр пропускания *OB-7 HC* и фотография его торца, полученная на электронном микроскопе (в верхнем правом углу)

### 2.2. Установка для исследования РИП на длине волны 1,55 мкм

Для исследования РИП исследуемых ОВ при реакторном облучении на длине волн 1,55 мкм была сконструирована установка, изображенная на рисунке 2.8



Рисунок 2.8 – Блок-схема установки для исследования РИП на длине волны 1,55 мкм

Концы исследуемых и референсных OB, выходящие из фланца АУ, привариваются к транспортным OB, идущим через реакторный зал к регистрирующей аппаратуре и источнику излучения к выводам и вводам которых также происходит приварка.

Сигнал от эрбиевого суперлюминесцентного источника, прошедший через референсные и исследуемые OB, регистрировался с помощью специально разработанного программного обеспечения.

До начала и в процессе облучения происходила регистрация сигнала от референсного  $I_r(t)$  и от исследуемого  $I_s(t)$  ОВ. Итоговое РИП на единицу длины рассчитывалось как разница оптических потерь в исследуемом и референсном ОВ нормированная на длину по следующей формуле:

$$RIA(t) = \frac{10}{\Delta L} \left( lg \frac{I_s(0)}{I_s(t)} - lg \frac{I_r(0)}{I_r(t)} \right)$$
(2.1)

где RIA(t)- РИП в момент времени t;

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

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

*∆L*-разница длин исследуемого и референсного OB.

Стоит отметить, что также отдельно анализировалось РИП на референсных и исследуемых каналах, при этом РИП рассчитывалось по формуле:

$$RIA_{s,r}(t) = 10 \left( lg \frac{I_{s,r}(0)}{I_{s,r}(t)} - lg \frac{I_R(0)}{I_R(t)} \right)$$
(2.2)

где  $RIA_{s,r}(t)$ - РИП в исследуемом или референсном ОВ момент времени *t*;

*I<sub>s,r</sub>(0)*- интенсивность сигнала исследуемого или референсного ОВ до начала облучения;

 $I_{s,r}(t)$ - интенсивность сигнала исследуемого или референсного OB в момент времени t;

 $I_R(O)$ - интенсивность сигнала референсного OB, который не входил в АУ, до начала облучения;

 $I_R(t)$ - интенсивность сигнала референсного OB, который не входил в АУ, в момент времени *t*.

По формуле (2) мы получали интегральное РИП, которое наводилось в ОВ, намотанных на сегмент АУ, и подводящих отрезков ОВ длиной 4,5 м, идущих к фланцу, которые находились также в радиационном поле.

С целью учета радиолюминесценции, которая могла давать вклад в интегральную интенсивность n-го канала, эрбиевый источник периодически отключался и при этом регистрировался темновой сигнал, если он был отличен от нуля, то он учитывался при вычислении РИП в формулах (2.1, 2.2), путем вычитания из сигналов  $I_r(t)$ ,  $I_s(t)$  сигнала  $I_{lum}(t)$ , где  $I_{lum}(t)$ - сигнал на фотодетекторах в процессе облучения при выключенном эрбиевом источнике.

2.3. Установка для исследования спектров РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм

Исследование спектров в ближнем ИК-диапазоне проводилось с помощью установки, изображенной на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Блок-схема установки для исследования спектров РИП в ближнем ИК-диапазоне

Свет от галогеновой лампы HL-2000 проходил через исследуемые и референсные OB и регистрировался с помощью спектрометра на линейке диодов In-GaAs AvaNIR128 фирмы Avantes в спектральном диапазоне 0,9-1,7 мкм, к которому был подключен оптомеханический свитчер, управляемый компьютером. Для минимизации явления фотообесцвечивания РЦО видимый свет от галогеновой лампы обрезался с помощью оптического фильтра ИКС-3, с полосой пропускания от 0,875 до 3 мкм. Регистрация спектров проходила в автоматическом режиме с заранее заданным временным шагом. Спектры РИП рассчитывались аналогично предыдущему пункту 2.1 по формулам (2.1, 2.2).

2.4. Характеристики и описание исследовательского реактора ИВГ.1М, общая схема эксперимента



1- центральный экспериментальный канал, 2- корпус реактора, 3- регулирующий барабан (РБ), 4- привод исполнительного механизма РБ, 5- железоводная защита

Рисунок 2.10 – Схема исследовательского реактора ИВГ.1М

Испытания оптоволокна и оптоволоконных датчиков проводились на реакторе ИВГ.1М. На рисунке 2.10 представлена упрощенная конструкция исследовательский реактора. В таблице 2.2 представлены основные характеристики реактора. Характеристика реакторного излучения, распределение потока нейтронов и гамма квантов по высоте экспериментального канала приведены на рисунках 2.11, 2.12, 2.13, 2.14.

Таблица 2.2 – Характеристики исследовательского реактора ИВГ.1М

Тепловая мощность	6 МВт
Эквивалентный диаметр активной зоны	548 мм
Высота активной зоны	800 мм
Топливо	сплав U и Zr
Обогащение по 235U	90 %
Загрузка 235U	4,6 кг
Теплоноситель	Вода



Рисунок 2.11 – Спектр нейтронов







Рисунок 2.13 – Распределение потока нейтронов по высоте экспериментального канала



Рисунок 2.14 – Распределение потока у- излучения по высоте экспериментального канала реактора

Облучательные испытания проводились в несколько этапов:

- один методический эксперимент с макетами оптоволокна и температурных датчиков, установленных в прототипе облучательного устройства (АУ) для проверки расчетных данных по нейтронно-физическим и теплофизическим характеристикам в реакторном эксперименте, для проверки конструктивных решений и для проверки работоспособности исследовательского информационно-измерительного оборудования;

- три реакторных эксперимента по испытанию радиационной стойкости оптоволокна и оптоволоконных датчиков при их идентичной комплектации в АУ в условиях облучения на разных мощностях реактора (1 и 6 МВт) при различных температурах исследуемых образцов.

2.4.2. Описание и схема эксперимента по облучению ОВ и датчиков на основе ВБР

Общая схема эксперимента представлена на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Общая схема эксперимента

### 2.4.3. Условия облучения

На реакторе ИВГ.1М (г. Курчатов) в период с 03.05.2019 г. по 29.05.2019 г. были проведены три кампании по облучению ОВ, приведенных в таблице 1.

В первых двух кампаниях (03.05.2019 г. и 15.05.2019 г.) ОВ облучались по 2 часа при максимальной фиксированной реактора 6 МВт и температуре 260-280 °C. В третьей кампании (29.05.2019 г.) ОВ облучались 4 часа при мощности реактора 1 МВт (первые 2 часа температура была равной 155 °C, вторые 2 часа – 210 °C) и час при мощности 6 МВт и температуре 355 °C. Временные зависимости мощности реактора и температуры приведены на рисунке 2.16.

За всё время облучения (по расчетам ИАЭ НЯЦ РК) поглощенная доза, обусловленная γ-облучением, составила 2,91·10<sup>7</sup> Гр ( при 1 МВт – 9,36·10<sup>6</sup> Гр,

при 6 МВт – 2,81·10<sup>7</sup> Гр ) при этом мощность дозы составляла 260 и 1570 Гр/с при мощностях реактора 1 и 6 МВт соответственно.

Флюенс быстрых нейтронов с энергией E>0,1 МэВ за весь период облучения составил 4,46·10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup>, при этом поток был равен  $10^{12}$  н/(см<sup>2</sup>·с) и 2,39·10<sup>13</sup> н/(см<sup>2</sup>·с) при мощностях реактора 1 и 6 МВт соответственно.

Общий флюенс нейтронов (включая тепловые с E<0,1 МэВ) за все время облучения составил 3,90·10<sup>18</sup> н/см<sup>2</sup>.



Рисунок 2.16 – Временные зависимости мощности реактора и температуры образцов

2.5 Выводы по главе 2

В данной главе описаны основные характеристики исследуемых OB. Описаны установки для исследования РИП на фиксированной длине волны 1,55 мкм и спектров РИП. Приведено описание реактора ИВГ.1М, а также общая схема эксперимента. Показано, что характеристики объекта исследования, установок и реактора способны обеспечить условия проведения экспериментов.

# ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО АМПУЛЬНОГО УСТРОЙСТВА (АУ)

В данной главе приведено описание и адаптирование волоконных световодов и датчиков температуры на основе волоконных Брэгговских решеток (ВБР), а также экспериментально-измерительного оборудования для проведения облучательных испытаний на реакторе ИВГ.1М. Приведено описание и различные этапы сборки конструкции экспериментального устройства (АУ). В ходе выполнения данной работы были проведены также нейтронно-физический расчет с использованием расчетного кода МСNР6 и теплофизический расчет с использованием программного комплекса ANSYS. Разработана методика проведения реакторных испытаний радиационно-стойких ОВ и волоконно-оптических ВБРдатчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с in-situ контролем.

Для проведения испытаний в условиях комбинированного гамманейтронного излучения на реакторе ИВГ.1М были отобраны радиационно-стойкие ОВ и волоконно-оптические датчики температуры зарубежных производителей, предоставленных организацией ИТЭР. В следующих подразделах приводится описание экспериментальных образцов и экспериментально-измерительного оборудования, предназначенных для проведения облучательных испытаний.

3.1 Волоконно-оптические датчики температуры на основе волоконных брэгговских решеток (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 OB с медным покрытием с одной и с двумя ВБР, внедренные в сэндвич, состоящий из двух металлических пластин толщиной менее 0,5 мм (рисунок 3.1).



а) с одной ВБР

ВБР б) с двумя ВБР Рисунок 3.1 – Устройство ВБР-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 1a) 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 16) 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  $h = 0,3\pm0,05$  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 состоит в измерении сдвига длины волны света, отраженной от ВБР (т.е. сдвиг волны резонанса ВБР). Резонансная длина волны зависит от показателя преломления ОВ, 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. Однако, кроме подходящих ВБР-датчиков температуры, должны быть соответствующие радиационностойкие одномодовые ОВ, связанные с волоконно-оптическими датчиками. В подразделе 3.2 представлено описание ОВ, предназначенных для проведения облучательных испытаний.

3.2 Радиационно-стойкие одномодовые волоконные световоды

В таблице 3.1 представлены радиационно-стойкие волоконные световоды зарубежных производителей для облучательных экспериментов на реакторе ИВГ.1М.

N⁰	Производитель	Покрытие	
1	RSO14-Pol-	Полиимилное	
2	RR-29-Pol		
3	1800	Мелное	
4	IVG		
5	Draka	Акрилатное	
6	HC-05b		
7	iXblu	Алюминиевое	
8	FORC-Photonics		

Таблица 3.1 – Волоконные световоды

Волокна различались по типу материала защитного покрытия: полиимид, акрилат меди или алюминий (таблица 3.1). На рисунке 2.1 показаны фотографии волокон с различным покрытием. Толщина покрытия для медного и алюминиевого – 20 мкм; полиимида – около 10 – 15 мкм; акрилата – 75 мкм.

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 ОВ производства Draka все то же самое, однако в сердцевине около 1 масс. % фтора.

3.3 Разработка и создание облучательного ампульного устройства

Для проведения испытаний радиационной стойкости оптических волокон и волоконно-оптических датчиков температуры в условиях комбинированного гамма-нейтронного облучения, изменения температура в требуемом диапазоне и обеспечения вакуума в полости объектов испытаний на стационарном исследовательском ядерном реакторе ИВГ.1М Института атомной энергии РГП НЯЦ РК (г.Курчатов, Республика Казахстан) было разработано экспериментальное облучательное ампульное устройство (рисунок 3.2).



мента АУ с установленными датчиками

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

Рисунок 3.2 – Облучательное ампульное устройство (АУ)

Облучательное экспериментальное ампульное 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 XA; труба, герметично соединенная с ампулой, через которую от внутреннего сегмента ампулы выводятся OB и термопары за пределы биологической защиты реактора; внешний узел, соединенный герметично с трубой, на котором монтируется оптоволоконный гермоввод и патрубок для соединения АУ с газовакуумной 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. ОВ выводится внутрь втулки, для предотвращения повреждения оптоволокна при загибе. ОВ 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). В соответствии с разработанной конструкцией, указанной выше были изготовлены комплектуюцие детали АУ, предназначенного для проведения методического реакторного эксперимента.

Далее была произведена сборка и монтаж АУ. На начальном этапе на внутренний медный сегмент АУ 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 ОВ и их референсы. Данный этап сборки отображен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Сборка внутреннего сегмента АУ

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 АУ. 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 АУ были выведены оптоволоконные концы исследуемых образцов и термопар для соединения с информационно-измерительным оборудованием посредством транспортного оптоволокна и компенсационных термопарных проводов. Герметичность внутреннего объема АУ обеспечивалась путем заливки герморазъема клеем К-400 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Герметизация АУ

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

Далее, АУ было загружено в физический экспериментальный канал реактора ИВГ.1М, таким образом, чтобы АУ с испытуемыми образцами датчиков и ОВ 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. На завершающей стадии подготовительных работ были выполнены необходимые технологические процедуры (откачка, прогрев вакуумных трактов). Таким образом, АУ был подготовлен к методическому реакторному эксперименту.

### Методическая часть

Одним из важнейших этапов разработки АУ, является проведение серии расчетных исследований по обоснованию соответствия конструкции экспериментального устройства целям эксперимента, таким как выбор режимов испытаний и исследование штатных и гипотетических аварийных режимов его работы. В ходе выполнения данной работы была проведена серия нейтронно-физических расчетов с использованием расчетного кода MCNP6 и теплофизических расчетов с использованием программного комплекса ANSYS для конфигураций AУ. В рамках подготовки методических реакторных экспериментов на реакторе ИВГ.1М была также разработана методика проведения реакторных испытаний ОВ и волоконно-оптических температурных датчиков.

3.4 Компьютерное моделирование

## <u>Расчет нейтронно-физических характеристик экспериментального ампуль-</u> ного устройства

На первом этапе были выполнены нейтронно-физические расчеты, результаты которых послужили входными данными для теплового моделирования. Расчеты выполнялись с использованием расчетного кода MCNP6 и библиотек ядерных констант ENDF/B-VII.0. Для проведения расчетов была разработана объединенная модель (рисунок 3.5), созданная на базе модели ИВГ.1М и расчетной модели экспериментального устройства.



а) Продольное сечение



б) Поперечное сечение

Рисунок 3.5 – Объединенная расчетная модель реактора ИВГ.1М и экспериментального устройства (АУ)

61

В процессе нейтронно-физического расчета определено влияние устройства на реактивность реактора, которая составила 0,37±0.05 β<sub>эфф</sub> без учета влияния датчиков и коммуникаций испытательного устройства. Указанная реактивность позволяла провести пуск реактора ИВГ.1М с ампульным устройством в центральном экспериментальном канале, обеспечивая требуемые параметры мощности, продолжительности непрерывной работы и соблюдения ядерной безопасности. Средний поток тепловых нейтронов в пазах медной втулки -7,58·10<sup>13</sup> н/см<sup>3</sup>·с. Средний поток у-частиц – 2,77·10<sup>14</sup> у/см<sup>3</sup>·с. Погрешность расчета удельной мощности энерговыделения материалов экспериментального устройства составило менее  $0.04 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>.

## Расчет теплофизических характеристик экспериментального ампульного устройства

Для тепло-гидравлического расчета принималось высотное распределение энерговыделения во втулке, согласно нейтронно-физическим расчетам. На внешней стенке модели заданы условия конвективного теплообмена с температурой окружающей среды 300 К и коэффициентом теплоотдачи 5 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Распределение температуры в медной втулке представлен на рисунке 3.6.



центру втулки

Рисунок 3.6 – Распределение температуры в медной втулке

с расходом теплоносителя 100 г/с

По результатам расчетов тепло-гидравлических параметров экспериментального устройства с использованием втулки, выполненной из меди М1 видно, что разница температуры в пазах втулки не превысит 4 К. Следовательно, высота верхнего и нижнего слоя втулки, расположенной над и под пазами, не оказывает воздействия на высотный градиент температуры.

По результатам проведенных исследований определены все необходимые параметры экспериментального устройства. Обеспечен заданный температурный градиент на наиболее ответственном элементе, обоснован выбор конструкции, материала, расположения в реакторе и расхода охлаждающего газа. Таким образом, завершен этап расчетных исследований экспериментального устройства для испытаний на реакторе ИВГ.1М.

3.5 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. Порядок проведения методического эксперимента был следующим:

1) оценка внесенного АУ изменения реактивности реактора;

2) откачка объема АУ высоковакуумным насосом до давления 10<sup>-2</sup> Торр и запуск регистрирующей аппаратуры для прогрева и установления стационарных значений;

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

 выход реактора на минимально контролированный уровень мощности реактора – 1 кВт;

5) регулировка подачи газообразного азота в систему охлаждения АУ;

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

7) непрерывная регистрация изменения давления в объеме АУ, температуры корпуса медного сегмента АУ (верх, низ) и корпуса оптического датчика, изменения светопроводимости ОВ, показаний оптических датчиков температуры (ВБР);

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

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.п.7,8 в течение еще 30 минут.

3.6 Результаты методического реакторного эксперимента

Методический эксперимент по испытанию радиационной стойкости OB и BБР-датчики проводился в условиях облучения на реакторе ИВГ.1М при стационарном потоке быстрых нейтронов 2,39·10<sup>13</sup> н/см<sup>2</sup>·с и γ-облучении 1570 Гр/с.

На рисунке 3.7 представлена диаграмма реакторного методического эксперимента. На диаграмме показано изменение температуры внутреннего сегмента АУ (одна термопара установлена в верхней части, другая в нижней части сегмента), изменение температуры корпуса оптического датчика температуры, изменение давления в объеме АУ и изменение тепловой мощности реактора ИВГ.1М в процессе реакторного эксперимента.





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 АУ	от 50 °С до 750 °С;
_	давление в объеме АУ	от 1 до 10 <sup>-2</sup> Торр;
_	мощность реактора	6 МВт;
_	время облучения	2 часа.

В результате проведенного методического реакторного эксперимента были получены временные и температурные зависимости изменения величины сигналов, проходящих через ОВ (рисунок 3.8) и волоконно-оптические датчики (рисунок 3.9) на длине волны 1,55 мкм в процессе комбинированного гамма-нейтронного облучения.

65



Рисунок 3.8 – Временная и температурная зависимость изменения величины сигналов, проходящих через ОВ 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).



Рисунок 3.9 – Временная зависимость сигналов исследуемых датчиков и по-

казаний термопары в процессе облучения

66

Из рисунка 3.9 видно, что при повышении температуры АУ до 490 °C вышел из строя оптический датчик с двумя ВБР. Другой оптический датчик повышение температуры отработал в штатном режиме. Также в результате проведенного методического эксперимента на реакторе ИВГ.1М. были отработаны режимы охлаждения АУ с целью достижения и стабилизации заданных значений температуры внутреннего сегмента АУ, определена степень возможного разряжения в объеме АУ создаваемая вакуумной системой стенда ЛИАНА в процессе реакторного облучения.

#### <u>Анализ полученных результатов</u>

В ходе проведенного анализа экспериментальных данных, полученных в методическом эксперименте, были рассчитаны радиационно-наведенные потери (РНП) исследуемых световодов на длине волны 1,55 мкм и определена зависимость этих потерь от температуры исследуемых световодов (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Временная зависимость рассчитанных радиационно-наведенных потерь (РНП) исследуемых ОВ 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 ОВ использовался еще и референсное ОВ меньшей длины. РНП рассчитывалось по следующей формуле:

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

*∆L*-разница длин исследуемого и референсного световодов.

Большая часть ОВ для каждого температурного диапазона показывает монотонный рост РНП в процессе облучения. Однако, ОВ Draka-Ac выбивается из общей картины. Причиной этого, по всей видимости, является то, что данное OB имеет акрилатное защитное покрытие, в отличие от остальных OB. Известно, что данное покрытие применялось только до температуры 150° C, 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 OB, например, посредством возникновения микроизгибных потерь.

Также были проанализированы данные, полученные с датчиков ВБР и построена зависимость сигналов исследуемых датчиков и показаний термопар в процессе облучения (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – 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/°C для свободного ВБР и ~ 20 ppm/°C для паяного ВБР). Также методический эксперимент показал, 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:

69

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

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

 показания термопар, установленных на внутреннем сегменте АУ, свидетельствуют о минимальном градиенте температуры по всему объему сегмента;

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

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

3.7 Выводы по главе 3

В ходе выполнения данной работы была разработана методика проведения реакторных испытаний радиационно-стойких OB и волоконно-оптических BБР-датчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с *in-situ* контролем. В процессе подготовки проведения методических реакторных испытаний был разработано и изготовлено экспериментальное устройство, 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 реакторе ИВГ.1М. Получена новая информация о спектроскопических свойствах различных OB и BБР-датчиков в ближнем ИК-диапазоне в условиях реакторного облучения. Анализ результатов методического эксперимента показал, что разработанная конструкция АУ и система измерений позволило проводить регистрацию всех заданных величин в условиях реакторного облучения. Предложенная методика проведения реакторных испытаний была успешно апробирована.

## ГЛАВА 4. НАВЕДЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ОВ ПРИ СМЕШАННОМ ГАММА-НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

В данной главе представлены предреакторые исследования изгибных и микроизгибных оптических потерь в температурном диапазоне 25-400 °C, а также исследования РИП, РИЛ в процессе реакторного облучения. Определены основные механизмы РИП на длине волны 1,55 мкм, а также их зависимости от флюенса и температуры в процессе облучения.

### 4.1. Предреакторные лабораторные исследования образцов ОВ.

Проведение предварительных исследований изгибных и микроизгибных оптических потерь в температурном диапазоне 25-400 °C была продиктована необходимостью дифференциации термо-индуцированных оптических потерь от радиационно-индуцированных в процессе реакторного облучения при повышенной температуре для получения корректных значений уровня РИП в исследуемых OB.

## <u>Исследование изгибных оптических потерь в исследуемых ОВ в</u> <u>температурном диапазоне 25-350 С.</u>

Известно, что при изгибе OB возможно появление дополнительных оптических потерь (изгибные потери) из-за туннелирования света из сердцевины через внутреннюю оболочку во внешнюю и «вытекание» света из OB [37]. Изгибные потери повышаются при уменьшении радиуса изгиба OB. В предыдущей главе было обосновано использование в качестве оснастки для OB и датчиков медного цилиндрического сегмента диаметром пазов для намотки OB равным 40 мм.

Таким образом, предварительно для всех исследуемых образцов ОВ из таблицы 2.1 были проведены измерения изгибных потерь при их намотке на цилиндр диаметром 40 мм, соответствующего диаметру медной оснастки.
Измерения показали, что при намотке 10 витков всех OB, кроме OB с полой сердцевиной – *HC*, не возникает дополнительных оптических потерь, связанных с изгибами.

OB с полой сердцевиной *HC* оказалось более чувствительным к изгибам, что является одной из особенностей данного типа OB [68]. Для OB *HC* добавочные потери оказались около 0,75 дБ на один виток диаметром 40 мм (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Зависимость оптических потерь от количества витков диаметром 40 мм для ОВ *HC* 

Далее мы рассмотрели влияние различных типов намотки OB на медный сегмент и поведение изгибных потерь при повышении температуры. При обычной намотке без учета натяжения ("намотка-1") происходит увеличение оптических потерь при увеличении температуры (рисунок 4.2) из-за появления изгибных оптических потерь в местах перехлеста витков OB вследствие термического расширения сегмента. Спектрально изгибные потери проявляются в виде длинноволнового поглощения (вставка на рисунке 4.2). При более свободной намотке на сегмент ("намотка-2") изгибные потери не проявлялись вплоть до температуры 500 °C.

Намотку типа "намотка-2" использовали для эксперимента по реакторному облучению, однако забегая вперед, отметим, что полностью избавиться от этого паразитного эффекта нам не удалось.



Рисунок 4.2 – Термоиндуцированные оптические потери при различных намотках на медную оснастку диаметром 40 мм в зависимости от времени и температуры. Спектры термоиндуцированных наведенных потерь при различных температурах

Стоит заметить, что изгибные потери носят обратимый характер, т.е. исчезают при уменьшении температуры (рисунок 4.2), поэтому их можно легко дифференцировать от длинноволнового РИП, которое является высокостабильным [60-62]. Однако, различить их спектрально от длинноволнового РИП в процессе облучения не представляется возможным (рисунок 4.2). Как известно из ряда работ, ОВ в металлических покрытиях из меди и алюминия проявляют могут проявлять так называемые микроизгибные оптические потери [38-40]. Поведение микроизгибных потерь сложным образом зависит от температуры [42]. Таким образом, для ОВ в металлических покрытиях были измерены термоиндуцированные микроизгибные потери в температурном диапазоне 25-400 °C.

Отрезки OB длиной 10 м в алюминиевом и медном защитных покрытиях (*Cu-2* и *Al* соответственно) были намотаны в бухты, диаметром 40 мм. Далее эти бухты были подвержены термическому отжигу как изохронному (рисунок 4.3 а), так и изотермическому (рисунок 4.3 б) и были выявлены уровни оптических потерь, связанные с микроизгибами защитного покрытия. Для OB в алюминиевом покрытии потери в максимуме при T=100 °C были около 0,015 дБ/м, однако при дальнейшем нагреве они уменьшались и при повторных циклах нагрева не наблюдались (рисунок 4.3 а). Отрицательный уровень потерь был связан с отжигом первоначальных микроизгибных потерь. Для OB в медном покрытии *Cu-2* максимальные потери при выдержке в течение 4 часов при температуре 350 °C с последующим остыванием до комнатной температуры были в районе 0,09 дБ/м (рисунок 4.3 б). К сожалению, OB *Cu-1*, *Acr*, *HC* не было в распоряжении для предварительных испытаний. Для всех полиимиднопокрытых OB дополнительных потерь при не наблюдалось.



Рисунок 4.3. – а) Зависимость микроизгибных потерь от температуры для OB *Al* при двух циклах температурного отжига (нагрев-1, нагрев-2),
б) зависимость микроизгибных потерь от времени выдержки при 100, 250 и 350 С в течение 4 часов для OB Cu-2

Таким образом предварительные лабораторные исследования позволили выявить возможное уровни и особенности поведения изгибных и микроизгибных оптических потерь в исследуемых ОВ. Стоит отметить, что из анализа литературных данных, приведенного в Главе 1, ожидаемый уровень РИП на длине волны λ=1,55 мкм при флюенсе быстрых нейтронов ~10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup> был порядка 1-10 дБ/м. Таким образом, по грубой оценке, суммарные эффекты микроизгибных и изгибных потерь не должны были превышать 10 %.

Однако, при анализе зависимостей РИП в процессе облучения и релаксации, мы столкнулись со всеми этими паразитными эффектами в большей степени, так как полученные значения РИП отличались от литературных примерно на порядок величины в меньшую сторону. Далее по тексту мы будем употреблять термин «наведенные потери», имея в виду в совокупности все три механизма (изгибные потери, микроизгибные потери и РИП).

Стоит отметить, что проведенные предварительные лабораторные исследования в значительной степени позволили повысить точность нахождения уровня РИП при реакторном облучении, о котором речь пойдет далее

## 4.2. Исследование зависимости РИП на длине волны 1,55 мкм

На реакторе ИВГ.1М (г. Курчатов) в период с 03.05.2019 г. по 29.05.2019 г. были проведены три кампании по облучению ОВ, приведенных в таблице 2.1. Подробно условия облучения описаны в Главе 2.

Рассмотрим отдельно полученные результаты зависимости РИП от времени облучения и релаксации при каждом отдельном пуске.

### Результаты первого пуска

На рисунке 4.4 представлены зависимости РИП на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм исследуемых ОВ от времени реакторного облучения при T=260 °C и мощности 6 МВт.

Бо́льшая часть ОВ показывает монотонный рост РИП в процессе облучения. Однако, ОВ *Acr* выбивается из общей картины. Причиной этого, по всей видимости, является то, что данный ОВ имеет акрилатное защитное покрытие, в отличие от остальных ОВ, приведенных на рисунке 4.4. Известно, что данное покрытие применимо только до температуры 100-150 °C, а в нашем случае облучение проводилось при температуре T=260 °C. По-видимому, это привело к деструкции защитного покрытия, что, в свою очередь, могло сказаться на волноводных свойствах OB, например, посредством возникновения микроизгибных потерь.



Рисунок 4.4 – Зависимость РИП от продолжительности облучения и релаксации. В процессе облучения температура была 260 °C, после облучения температура медленно спадала от 260 до 100 °C. Флюенс и поглощенная доза в конце облучения составили  $\Phi_{E>0.1MeV}=1,72\cdot10^{17}$  н/см<sup>2</sup> и D<sub>γ</sub>=11,3 МГр соответственно. РИП ОВ *НС* выражено в дБ, а не в дБ/м из-за относительно низкой величины потерь.

Уровень РИП остальных ОВ (кроме ОВ *Cu-2* и *Acr*) в конце облучения находится в интервале 0,15-0,19 дБ/м при поглощенной дозе  $D_{\gamma}=11,3$  МГр и флюенсе быстрых нейтронов с энергией E > 0,1 MeV  $\Phi=1,72 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup>. Стоит отметить, что в немногочисленных работах, посвящённых исследованию ОВ при близких к нашим условиям, например [24, 28], РИП на длине волны  $\lambda=1,55$  мкм было порядка ~1 дБ/м, что в 4-5 раз больше чем в нашем случае. Это вероятно связано с большей температурой в нашем случае.

Заметим, что два OB, вытянутые из одной и той же преформы, в полиимидном и алюминиевом покрытиях (*Po1-1* и *Al* соответственно) демонстрируют очень схожее поведение наведенных потерь в процессе и после облучения, которые в значительной степени обусловлены РИП. Это сравнение показывает, что РИП при реакторном облучении в основном обусловлено химическим составом сердцевины и оболочки OB, а не условиями при вытяжке.

Можно заметить, что OB Cu-2 претерпевает резкий скачок наведенных потерь на 0,12 дБ/м в самом начале облучения и эта добавка остается в процессе всего облучения и релаксации после облучения (рисунок 4.4). Этот эффект, повидимому, связан с повышением микроизгибных потерь при резком повышении температуры до 260 °C [38, 39]. Наши предварительные исследования, приведенные выше, показали, что для OB Cu-2 происходит увеличение потерь до ~0,1 дБ/м при выдержке при температуре 350 °C в течение 4 часов с последующим охлаждением до комнатной температуры (рисунок 4.3 б). Вполне возможно, характер температурной зависимости микроизгибных потерь при гамма-нейтронном облучении может отличаться от температурной зависимости без воздействия облучения. Другой менее вероятной причиной резкого изменения потерь могла быть разъюстировка соединений в местах сварки или появление трещины в OB.

Отметим, что другое OB в медном защитном покрытии *Cu-1* не испытывает аналогичного скачка наведенных потерь. Одной из возможных причин этого может быть тот факт, что покрытие данного OB не содержало буферного слоя из углерода (таблица 2.1). Таким образом, описанный выше эффект может зависеть от определенных технологических параметров, например, от толщины оболочки и защитного покрытия, а также от условий вытяжки.

Также из таблицы 2.1 видно, что для OB *Cu-2* толщина нанесенной оболочки была меньше, что могло приводить к большему проявлению микроизгибных потерь в данном OB. Резкий скачок наведенных потерь для всех ОВ в момент времени 145 мин на рисунке 4.4 связан со скачком температуры с 260 до 280 °C и обратно из-за уменьшения расхода охлаждающего азота в процессе облучения. Данный скачок обусловлен увеличением изгибных потерь из-за изгиба ОВ в местах перехлестов вследствие термического расширения медной оснастки, на которой были намотаны ОВ. Отметим, что намотка ОВ на медную оснастку проводилась с учетом её термического расширения («намотка-2» на рисунке 4.2), однако полностью избавиться от эффекта изгибных потерь не удалось, что видимо связано с произвольным распределением витков в пазах медной оснастки в процессе сборки облучательного ампульного устройства (АУ).

Повышение наведенных потерь при увеличении температуры позволило нам численно оценить величину изгибных потерь. Увеличение температуры с 260 до 280 °C привело к повышению изгибных потерь на 0,01-0,014 дБ/м во всех OB за исключением *Cu-2*. Таким образом, при нормировке на температуру, мы получаем величину изгибных потерь не более чем  $7 \cdot 10^{-4}$  дБ/(м·°C) при T>260 °C.

После окончания облучения (150-255 мин) наведенные потери снижаются с понижением температуры (рисунок 4.4). Это снижение объясняется суммой двух эффектов: термический распад РЦО, ответственных за РИП и уменьшение изгибных потерь вследствие сжатия медной оснастки с понижением температуры.

Отметим поведение наведенных потерь для OB *Cu-1* во временном интервале 210-225 мин. Наведенные потери начинают расти даже при комнатной температуре. Это видно при сравнении рисунке 4.4 и рисунке 4.5, приведенного ниже. Этот рост обусловлен повышением микроизгибных потерь со снижением температуры.

Стоит обратить внимание на OB с полой сердцевиной револьверного типа *HC*, который не имел референсной пары (рисунок 4.4). Для него наведенные потери обозначены просто в дБ по оси OY. OB показывает отрицательные потери равные -0,05 дБ в процессе облучения, что может быть связано с уменьшение изгибных потерь, которые были внесены при его намотке на медную оснастку (рисунок 4.1). При понижении температуры после окончания облучения наведенные потери возвращаются на исходный, практически нулевой уровень.

Несмотря на изгибную чувствительность ОВ *HC* является очень перспективным для внутриреакторых применений, т.к. его изгибные и начальные оптические потери (таблица 2.1) могут быть много меньше, чем радиационно-индуцированные потери в одномодовых ОВ с сердцевиной из кварцевого стекла. Еще одной проблемой являются потери на сверке при стыковке из со стандартными ОВ. Однако, на данный момент исследования активно ведутся в этом направлении [71].

### <u>Результаты второго пуска</u>

На рисунке 4.5 представлены зависимости РИП на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм исследуемых ОВ от времени реакторного облучения при T=270-280 °C и мощности реактора 6 МВт. После окончания облучения температура резко снижалась от 280 °C до 100 °C в отличие от первого облучения, в котором происходило медленное снижение температуры (рисунок 4.4).

Все ОВ практически не продемонстрировали изменения наведенных потерь на длине волны 1,55 мкм в течение 12 дней между пусками, за исключением ОВ *Си-1* (рисунки 4.4 и 4.5).

Переходной процесс в самом начале облучены в одномодовых OB (рисунок 4.5) может быть объяснен следующим образом. В начале повторного облучения происходит резкое возрастание РИП. Авторы работы [24] объясняют резкий скачок РИП наличием предшественников для РЦО (электронно-дырочных ловушек), оставшимися не отожжёнными после первого облучения, которые быстро заполняются при возобновлении облучения и становятся причиной РИП [24]. А увеличение температуры вслед за выходом реактора на мощность приводит к небольшому термическому отжигу РИП. Стоит отметить, что в резком повышении наведенных потерь в начале облучения возможно ест небольшой вклад и изгибных потерь.



Рисунок 4.5 – Зависимость РИП от продолжительности облучения и релаксации. В процессе облучения температура составляла 270-280 °C, после облучения температура быстро упала от 280 до 100 °C. *РИП* ОВ *FORC-HC* выражено в дБ, а не в дБ/м. Флюенс и поглощённая доза за второе облучения  $\Phi_{E>0,1M_{2}B}=1,72\cdot10^{17}$  н/см<sup>2</sup> и D<sub>γ</sub>=11,3 МГр соответственно. Общий флюенс за два облучения  $\Phi=3,44\cdot10^{17}$  н/см<sup>2</sup>, поглощенная доза D<sub>γ</sub>=22,6 МГр. РИП ОВ *HC* выражено в дБ, а не в дБ/м из-за относительно низкой величины потерь.

В ОВ *Си-1* кроме процесса, описанного выше, происходит еще пертурбация микроизгибных потерь с ростом температуры (рисунок 4.5).

Далее для всех ОВ, кроме *HC*, мы наблюдаем практически линейный рост наведенных потерь, обусловленных в основном поглощением РЦО. Одинаковый угол наклона для всех ОВ говорит о одинаковой радиационной стойкости этих ОВ в данном интервале флюенса быстрых нейтронов и поглощенной дозы.

Резкое уменьшение наведенных потерь после окончания облучения (временная точка 150 минут на рисунке 4.5) обусловлено двумя эффектами: в большей степени радиационным отжигом РЦО и в меньшей – уменьшением изгибных потерь. В общем качественно уменьшение наведенных потерь происходит аналогично первому пуску (рисунок 4.4), только длительность процесса во втором пуске меньше (рисунок 4.5).

После двух пусков поглощенная доза составила  $D_{\gamma}=22,6$  МГр и флюенс быстрых нейтронов  $\Phi=3,44\cdot10^{17}$  н/см<sup>2</sup>. После окончания релаксации наведенных потерь (240 мин на рисунке 4.5) наведенные потери находились в промежутке 0,17-0,20 дБ/м. Наведенные потери для ОВ *Си-2* были в районе 0,29 дБ/м, однако вычитая первоначальный скачок в 0,12 дБ/м при первом пуске мы получаем 0,17 дБ/м, как и для остальных ОВ. Стоит отметить, что данные уровни наведенных потерь обусловлены поглощением РЦО, т.е являются РИП, так как эффектами изгибных и микроизгибных потерь при комнатной температуре можно пренебречь.

На рисунке 4.5 мы можем видеть также отличное от всех поведение ОВ HC, пропускание которого улучшилось на 0,06 дБ по сравнению с исходным уровнем до начала облучения (рисунок 4.4).

#### <u>Результаты третьего пуска</u>

На рисунке 4.6 представлены зависимости РИП на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм исследуемых ОВ и температуры от времени реакторного облучения. ОВ облучались 4 часа при мощности реактора 1 МВт (первые 2 часа температура была равной 155 °C, вторые 2 часа – 210 °C) и один час при мощности 6 МВт и температуре 355 °C. После трех пусков ректора поглощенная доза составила  $D\gamma$ =2,91·10<sup>7</sup> Гр, а суммарный флюенс  $\Phi = 4,46 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup>.



Рисунок 4.6 – Зависимости РИП на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм и температуры исследуемых ОВ от продолжительности реакторного облучения. ОВ облучались 4 часа при мощности реактора 1 МВт (первые 2 часа температура была равной 155 °C, вторые 2 часа – 210 °C) и час при мощности 6 МВт и температуре 355 °C. Общая поглощенная доза в конце облучения составила 2,91·10<sup>7</sup> Гр (при 1 МВт – 9,36·10<sup>6</sup> Гр, при 6 МВт – 2,81·10<sup>7</sup> Гр ) Флюенс быстрых нейтронов с энергией Е > 0,1 МэВ составил Ф=4,46·10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup> С левой стороны от черной пунктирной линии располагаются зависимости РИП в процессе облучения (7 500-25 600 с) и после прекращения облучения (25 600-28 000 с), с правой стороны от линии располагаются зависимости РИП от времени релаксации, снятые через день после облучения. РИП ОВ *HC* выражено в дБ, а не в дБ/м из-за относительно низкой величины потерь.

До начала облучения во временном интервале 0-30 мин мы можем оценить разброс РИП для исследуемых ОВ после двух недель релаксации после облучения без вклада микроизгибных и изгибных потерь. Вычитая первоначальный

скачок наведенных потерь для ОВ *Си-2*, мы получаем РИП на длине волны 1,55 мкм для всех ОВ в интервале 0,16-0,20 дБ/м. Наименьшее РИП имело ОВ в полиимидном покрытии *Pol-2* (рисунок 4.6).

Контролируемое изменение температуры при неизменной мощности реактора в первые 4 часа в третьем пуске позволило в полной мере оценить влияние температуры на радиационно-индуцированное поглощение в ближнем ИК-диапазоне.

В самом начале облучения наведенные потери резко возрастают (рисунок 4.6) аналогично началу второго пуска из-за восстановления РЦО вследствие заполнения электронно-дырочных ловушек, которые не успели термически распасться [24]. После повышения температуры до 150 °C происходит термический отжиг РЦО, который выражается в уменьшении РИП (временная точка 40 мин. на рисунке 4.6). В этот момент вклады от изгибных и микроизгибных потерь практически отсутствуют, т.к. температура находилась на сравнительно небольшом уровне – T=150 °C. После переходного процесса РИП практически линейно растер на 15-20 % пока не начинается подъем температуры с 150 до 200 °C. При повышении температуры происходит небольшой отжиг РЦО и далее РИП остается практически на постоянном квазистационарном уровне.

Повышение мощности реактора до 6 МВт и температуры до 355 °С приводит, во-первых, к резкому росту изгибных потерь. Скачок изгибных потерь для OB *Cu-2* наименьший среди всех одномодовых OB (рисунок 4.6), аналогично изгибные потери вели себя и при первом пуске для данного OB (риунок. 4.4). Данное поведение, по-видимому, связано с наиболее свободной намоткой этого OB, что привело к уменьшению изгибной чувствительности при повышении температуры из-за термического расширения медной оснастки, на которой располагались исследуемые OB.

Основываясь на оценке изгибных потерь, сделанных по результатам первого пуска (подраздел 4.2.1), мы определили, что повышение температуры до 355 °C должно приводить к повышению изгибных потерь не более чем на 0,07 дБ/м. Примерно на эту величину и происходит уменьшение наведенных

85

потерь для всех OB, кроме *Cu-2*, после окончания облучения (340 мин на рисунке 4.6).

Стоит также отметить, что несмотря на облучение при мощности реактора 6 МВт происходит спад РИП, что обусловлено более интенсивным процессом термического распада РЦО при температуре 355 °C. Интересно, что выдержка в течение одного часа при этой температуре приводит к уменьшению РИП до уровня до начала третьего пуска (рисунок 4.6). Таким образом, повышение температуры в процессе реакторного облучения можно использовать для уменьшения РИП, т.е. повышения радиационной стойкости на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм.

Через 2 дня релаксации при комнатной температуре после третьего облучения, РИП на длине волны 1,55 мкм для всех ОВ (с учетом первоначального скачка для ОВ *Cu-1*) варьировалось в интервале 0,12-0,16 дБ/м (таблица 4.1)

N⁰	Название ОВ	РИП, дБ/м
1	Pol-1	0,16
2	Cu-1	0,14
3	Al	0,16
4	Cu-2	0,27*
5	Acr	0,27
6	Pol-2	0,12
7	НС	-0,06 дБ

Таблица 4.1 – РИП в ОВ на длине волны 1,55 мкм через 2 дня релаксации

\* РИП без учета скачка наведенных потерь в начале первого пуска (рисунок 4.4)

Для ОВ с воздушной сердцевиной *HC* РИП на длине волны 1,55 мкм находилось на уровне -0,06 дБ, на данный уровень наведенные потери вышли в начале второго пуска (рисунок 4.5). Стоит отметить, что в работе [24] РИП при реакторном облучении для фотонно-кристаллического ОВ с воздушной сердцевиной также было близко к нулю. ОВ *Pol-1* и *Al*, вытянутые из одной заготовки показали практически одинаковый уровень РИП. В отличие от OB, покрытых медью, алюминопокрытое OB практически не проявило микроизгибных потерь. Как было показано в работе [42], микроизгибные потерь в алюминопокрытых OB проявляются только до температуры ~100 °C, к тому же при помощи предварительной термообрабоки от них можно избавиться практически полностью [42]. Таким образом, алюминопокрытые OB имеют преимущество перед меднопокрытыми OB во внутриреакторных применениях. К недостатку алюминия в качестве защитного покрытия можно приписать только меньшую температуру плавления – 660 °C против 1080 °C у меди.

Суммируя и сравнивая полученные результаты с литературными данными получаем, что при общей поглощенной дозе  $2,91 \cdot 10^7$  Гр и флюенсе быстрых нейтронов  $4,46 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> с энергией E>0,1 МэВ мы получили РИП более чем на порядок ниже, чем в литературных данных, так, например, в работе [1], при флюенсе  $6,19 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> и поглощенной дозе  $15 \cdot 10^7$  Гр РИП на 1,55 мкм было около 2,5 дБ/м в ОВ с нелегированной сердцевиной. Данная разница может быть обусловлена меньшей температурой при облучении в работе [2] – около 50 °C, либо различием в исследуемых OB.

## 4.3. Исследование спектров РИП в диапазоне длин волн 1,1-1,7 мкм

Для OB *Pol-1* кроме исследования зависимости РИП от времени облучения еще параллельно происходила регистрация спектров РИП в диапазоне длин волн 1,1-1,7 мкм. На рисунке 4.7 приведены временные точки, в которых происходила регистрация спектров.



Рисунок 4.7 – Зависимость РИП ОВ *Pol-1* от продолжительности облучения и релаксации после облучения на длине волны λ=1,55 мкм при трех облучениях. Стрелками показаны временные точки, в который происходила регистрация спектров РИП. Красной кривой обозначена зависимость температуры во время облучения и релаксации после облучения.

Из спектров, зарегистрированных при первом облучении видно, что в самом начале облучения (спектр 1) происходит рост коротковолнового хвоста РИП, связанного с РЦО, центры полос которых находятся в диапазоне длин волн  $\lambda < 1,1$  мкм. При дальнейшем облучении кроме коротковолнового хвоста РИП начинает интенсивно возрастать длинноволновый хвост РИП с центром полосы поглощения в диапазоне длин волн  $\lambda < 1,7$  мкм (спектры 2,3). После окончания облучения происходит снижение РИП во всем спектральном диапазоне 1,1-1,7 мкм (спектр 4). Стоит отметить, что в релаксацию РИП в длинноволновом диапазоне вносит вклад уменьшение микроизгибных оптических потерь при

88

уменьшении температуры после окончания облучения. К сожалению, этот вклад невозможно в данном случае дифференцировать от релаксации РИП, связанного с термическим отжигом РЦО.



Рисунок 4.8 – Спектры РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм, зарегистрированные в процессе первого облучения. Спектр 1 соответствует поглощенной дозе  $D_{\gamma}=1$  МГр, флюенсу  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B} = 1,43 \cdot 10^{16} \text{ H/cm}^2$  и температуре T=253 °C; спектр 2 –  $D_{\gamma}=7,6$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=0,9 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=255 °C; спектр 3 –  $D_{\gamma}=10,8$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=1,65 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=255 °C; спектр 4 –  $D_{\gamma}=11,3$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=1,72 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=100 °C.

При втором облучении (рисунок 4.9) наблюдается аналогичная первому облучению картина с той разницей, что до начала облучения (спектр *1*') мы уже имеем остаточное РИП, обусловленное в основном длинноволновым долгоживущим РИП. Отметим, что при этом коротковолновый хвост РИП в значительной степени релаксирует, это видно из сравнения спектра *4* на рисунке 4.8 и спектра *1* ' на рисунке 4.9.

Интересным является тот факт, что в спектрах РИП ОВ *Pol-1* в полиимидном покрытии не наблюдается рост полосы поглощения гидроксильных групп с максимумом на длине волны λ=1,38 мкм, который обусловлен сдвигом протонов от полиимидного покрытия с последующей их диффузией в сердцевину [28]. В работах [28, 29] было показано, что данное явление наряду с длинноволновым РИП являются основными механизмами, ограничивающими радиационную стойкость в ОВ с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла.

Разница в поведении РИП возможно обусловлена тем, что в предыдущих работах исследовались многомодовые OB с малой толщиной светоотражающей оболочки ~ 10 мкм, а в этой работе мы исследовали одномодовые OB с толщиной оболочки 55-60 мкм, через которую при данных условиях (поглощенной дозе, флюенсе и температуре) выбитые из оболочки протоны, видимо, не успевают продиффундировать до сердцевины OB.



Рисунок 4.9 – Спектры РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм, зарегистрированные в процессе второго облучения. Спектр 1' соответствует поглощенной дозе  $D_{\gamma}=11,3$  МГр, флюенсу  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \rightarrow B}=1,72 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> и температуре T= 25 °C; спектр 2' –  $D_{\gamma}=16,8$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \rightarrow B}=2,53 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup>, T=270 °C; спектр 3' –  $D_{\gamma}=22,6$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \rightarrow B}=3,44 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup>, T=280 °C; спектр 4' –  $D_{\gamma}=22,6$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \rightarrow B}=3,44 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup>, T=100 °C.



Рисунок 4.10 – Спектры РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм, зарегистрированные в процессе третьего облучения. Спектр 1" соответствует поглощенной дозе  $D_{\gamma}=22,6$  МГр, флюенсу  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B} = 3,44 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$  и температуре T= 25 °C; спектр 2"–  $D_{\gamma}=22,9$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=3,47 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=155 °C; спектр 3"–  $D_{\gamma}=23,1$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=3,51 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=155 °C; спектр 4"–  $D_{\gamma}=23,3$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=3,54 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=210 °C; спектр 5"–  $D_{\gamma}=23,6$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=3,58 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=350 °C; спектр 6"–  $D_{\gamma}=29,1$  МГр,  $\Phi_{E>0,1 \text{ M} \to B}=4,46 \cdot 10^{17} \text{ H/cm}^2$ , T=350 °C.

В процессе третьего облучения изменялись температура и мощность реактора (рисунок 4.7). Интересным явился тот факт, что повышение температуры при облучении в значительной степени благоприятствует уменьшению РИП, что связано с термическим отжигом РЦО, ответственных за длинноволновый хвост РИП (рисунок 4.10). Например, спектр 6", зарегистрированный при наибольшей поглощенной дозе и флюенсе (2,91·10<sup>7</sup> Гр и  $\Phi_{E>0.1 \text{ MeV}} = 4,46 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup> соответственно), имеет менее интенсивное длинноволновое РИП, чем спектры 2''-5'', зарегистрированные при меньших поглощенных дозах и флюенсах.

### 4.4. Исследование радиолюминесценции в процессе облучения

Как было описано в Главе 2 в разделе 2.2 с описанием установки для регистрации РИП на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм, в процессе облучения эрбиевый суперлюминесцентный источник отключался на 5 секунд каждые 30 минут для регистрации потенциально возможного сигнала от радиационно-индуцированной люминесценции (РИЛ).

Так как в качестве приемников оптического сигнала использовались фотодиоды на основе гетероструктуры InGaAs, которые чувствительны в диапазоне 0,85-1,75 мкм, то мы могли кроме сигнала на рабочей длине волны 1,55 мкм иметь добавку от более коротковолновой РИЛ. Наименьший уровень детектируемого сигнала установки был на уровне -60 дБм. Однако, никакого сигнала от РИЛ в интервалах отключения источника света не было зарегистрировано. Не исключено, что РИЛ в исследуемых ОВ выходил за динамический диапазон, так, например, в работах [25] РИЛ в ближнем ИК-диапазоне для многомодовых ОВ не превышал ~ -70 dBm.

### 4.5. Выводы по главе 4

В данной главе описаны результаты впервые проведенного сравнительного исследования РИП в пяти номинально радиационно-стойких одномодовых ОВ и в ОВ с полой сердцевиной различных производителей на длине волны λ=1,55 мкм в условиях реакторного облучения. Выбранные ОВ имели практически все возможные термостойкие покрытия из: полиимида, алюминия и меди. ОВ с медным покрытием были исследованы в столь жестких радиационных условиях впервые. Также были проведены предварительные исследования температурно-индуцированных оптических потерь и определен их уровень для металлопокрых ОВ для температурного диапазона 25-400 °C.

Максимальный флюенс быстрых нейтронов составил  $\Phi = 4,46 \cdot 10^{17}$  н/см<sup>2</sup>;  $\gamma$ -доза – 2,91 · 10<sup>7</sup> Гр. Так как исследуемые ОВ выбирались с точки зрения их применимости внутри ядерных и термоядерных установок, в том числе и в ИТЭР, то интересовало поведение ОВ при облучении при повышенных температурах – 155-355 ° С. Для более полного воспроизведения условий ИТЭР ОВ облучались в условиях вакуума в течение всей кампании.

Во всех ОВ, кроме радиационно-индуцированных потерь мы столкнулись с эффектом увеличения изгибных оптических потерь. По всей видимости, это происходило из-за перехлестов витков ОВ, располагающихся в пазах медной оснастки при повышении температуры. При температуре ниже 260 °C изгибные потери не появлялись, при более высокой температуре изгибные потери не превышали ~7·10<sup>-4</sup> дБ/(м·°C), как следует из наших оценок, основанных на экспериментальных данных.

Кроме этого, в ОВ в медном покрытии наблюдалось появление микроизгибных потерь при повышении температуры до 260 °С.

Все эти паразитные эффекты следует принимать во внимание при реальных внутриреакторных применениях OB.

Стоит отметить, что OB, вытянутые из одной и той же заготовки, в алюминиевом и полиимидном покрытиях, показали практически аналогичное РИП в процессе всего облучения похожие потери за всю кампанию. Таким образом, режимы вытяжки OB, не влияют на радиационную стойкость OB.

Очевидно, что алюминиевое покрытие оказалось практически свободным от микроизгибных потерь и единственным его недостатком является более низкая температура плавления, чем у медного покрытия. В зависимости от реального диапазона температур внутриреакторное транспортное волокно с алюминиевым или полиимидным покрытием может иметь преимущество перед волокном с медным покрытием. Через два дня после окончательной остановки реактора четыре из пяти OB показали сравнимые радиационно-индуцированные потери на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм – 0,12-0,16 дБ/м. Если скорректировать потери OB с медным покрытием из-за необратимого роста микроизгибных потерь, продемонстрированного сразу при повышении температуры до 260 °C, его чистый РИП составит 0,15 дБ/м, то есть он также находится в указанном выше интервале.

Таким образом, все ОВ продемонстрировали практически одинаковую радиационную стойкость с точки зрения радиационно-индуцированных потерь на длине волны на 1,55 мкм. Достигнутый уровень РИП более чем на порядок ниже, чем в известных литературных источниках, что вероятно связано с заметно более высокой температурой в нашем эксперименте или более высокой радиационной стойкостью наших OB.

Помимо OB с сердцевиной из чистого кварцевого стекла исследовалось OB револьверного типа с полой сердцевиной. Оно показало практически нулевое РИП на длине волны  $\lambda$ =1,55 мкм в процессе всего облучения. Несмотря на чувствительность к изгибу, OB с полой сердцевиной представляется многообещающим в качестве внутриреакторного транспортного волокна.

Исследование спектров РИП подтвердило более ранние наблюдения, что РИП на  $\lambda$ =1,55 мкм возникает из-за длинноволнового поглощения с максимумом в диапазоне  $\lambda$ >1,7 мкм, природа которого остается неизвестной.

В отличие от аналогичных предыдущих исследований, мы не наблюдали эффекта роста полосы поглощения 1,38 мкм ОН-групп, который мог быть результатом смещения протонов из полимерного покрытия в сердцевину или радиационно-индуцированной диффузии атомарного или молекулярного водорода из полимерного покрытия. Одна из причин может заключаться в более толстой оболочке и более тонкой сердцевине в наших ОВ по сравнению с исследованными ранее многомодовыми ОВ. Другая, наиболее вероятная, причина состоит в условиях эксперимента: облучение проводилось в вакууме, таким образом, водород эффективно откачивался из ампульного устройства. Важным с практической точки зрения является установление значительного уменьшения РИП при повышении температуры до 355 °C даже при одновременном увеличении мощности реактора до 6 МВт из-за термического отжига РЦО, ответственных за длинноволновое РИП.

Также установлено, что в спектральном диапазоне 0,8-1,7 мкм в процессе реакторного облучения при мощности дозы 1570 Гр/с и потоке быстрых нейтронов 2,39·10<sup>13</sup> н/(см<sup>2</sup>·с) при реакторном облучении нет паразитного вклада радиолюминесценции на детектируемом уровне сигнала больше -60 дБм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

- Смоделировано и разработано облучательное ампульное устройство для реактора ИВГ.1М, позволяющее проводить исследование радиационной стойкости оптических волокон и датчиков температуры и деформации на основе волоконных брэгговских решеток в процессе и после смешанного гамма-нейтронного облучения при контролируемой вариации температуры и давления в ампульном устройстве.
- Разработаны методики по совместному облучению на реакторе ИВГ.1М и исследованию основных параметров оптических волокон и датчиков на основе ВБР. Данные методики также могут применяться для исследования радиационной стойкости оптических волокон и датчиков на других исследовательских реакторах.
- 3. Радиационно-индуцированное поглощение в оптических волокнах с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и фторированной оболочкой в ближнем ИК-диапазоне на длине волны 1,55 при смешанном гамманейтронном облучении сильно зависит от температуры. При увеличении температуры от 200 до 350 °C РИП снижается на ~30 % при поглощенной дозе 2,8·10<sup>7</sup> Гр и флюенсе быстрых нейтронов 4,4·10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup>.
- Наличие вакуума при реакторном облучении приводит к отсутствию возрастания полосы поглощения гидроксильных групп на длине волны 1,38 мкм при реакторном облучении, что обусловлено отсутствием диффузии водорода в процессе облучения.
- В ближнем ИК-диапазоне на длинах волн 0,8-1,7 мкм при реакторном облучении нет паразитного вклада радиолюминесценции на детектируемом уровне сигнала больше - 60 дБм.

6. На длине волны 1,55 мкм РИП света в одномодовых ОВ с нелегированной сердцевиной из чистого кварцевого стекла при поглощенной дозе 2,81·10<sup>7</sup> Гр и флюенсе быстрых нейтронов 4,46·10<sup>17</sup> н/см<sup>2</sup>при температуре облучения 150-350 °С находится в интервале 0,12-0,16 дБ/м, что говорит о возможности их использования в ядерных и термоядерных установках.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ОУ, АУ облучательное ампульное устройство
- ВБР волоконная брэгговская решетка;
- ВС волоконный световод;
- ИК инфракрасный;

ИТЭР – от англ. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) проект международного экспериментального термоядерного реактора;

ОВ – оптическое волокно;

ПВО – полное внутреннее отражение

- ПП показатель преломления;
- РИП радиационно-индуцированное поглощение;
- РИЛ радиационно-индуцированная люминесценция;
- РИИПП радиационно-индуцированное изменение показателя преломления;
- РНП радиационно-наведенные потери;
- РЦО радиационный центр окраски;

УФ – ультрафиолетовый;

LTIRA – «Low Temperature Infra-Red Absorption» с англ. низкотемпературное длинноволновое поглощение;

NBOHC- «non bridging oxygen hole center» с англ. дырочный центр на немостиковом атоме кислорода;

- MM «multi-mode» с англ. многомодовый;
- SM «single mode» с англ. одномодовый

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. J. Canning, "Fiber gratings and devices for sensors and lasers," *Lasers and Photonics Reviews*, vol. 2, no. 4, 275-289, 2008.
- 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.
- 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
- 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
- B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 57-79, 2003.
- 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.
- K. Dulon "Optic sensors. Testing the resistance to radiation," ITER Newsline, 2 Jul 2018 [Online]. Available: https://www.iter.org/newsline/-/3062.
- 8. A. Gusarov, "Long-term exposure of fiber Bragg gratings in the BR1 low-flux nuclear reactor," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 57, no. 4, pp. 2044–2048, Aug. 2010.
- 9. A. Morana et al., "Radiation tolerant fiber Bragg gratings for high temperature monitoring at MGy dose levels," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 18, pp. 5313–5316, Sep. 2014.
- 10.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.

- 11.A. Wilson, James, S. W. and Tatam, R. P., "Time-division-multiplexed interrogation of fibre Bragg grating sensors using laser diodes," *Meas. Sci. Technol.* vol. 12, no. 2, pp. 181-187
- 12.Girard S. et al. Integration of optical fibres in megajoule class laser environments: Advantages and limitations //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2012. – T. 59. – №. 4. – C. 1317-1322.
- 13.Girard S. et al. Radiation effects on silica-based optical fibres: Recent advances and future challenges //IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. T. 60. №. 3. C. 2015-2036.
- 14.Decreton M., Shikama T., Hodgson E. Performance of functional materials and components in a fusion reactor: the issue of radiation effects in ceramics and glass materials for diagnostics //Journal of nuclear materials. – 2004. – T. 329. – C. 125-132.
- 15.Donné A. J. H. Plasma diagnostics in view of ITER //Fusion Science and Technology. – 2012. – T. 61. – №. 2T. – C. 357-364.
- 16.de Vicente S. M. G., Hodgson E. R., Shikama T. Functional materials for tokamak in-vessel systems—status and developments //Nuclear Fusion. 2017. T. 57. №. 9. C. 092009.
- 17.Gusarov A. et al. Radiation induced absorption of hydrogen-loaded pure silica optical fibres with carbon coating for ITER diagnostics //Fusion Engineering and Design. – 2020. – T. 151. – C. 111356.
- 18.Maas A. C. et al. Diagnostic experience during deuterium–tritium experiments in JET, techniques and measurements //Fusion engineering and design. 1999. T. 47. №. 2-3. C. 247-265.
- 19.Ramsey A. T. D-T radiation effects on TFTR diagnostics //Review of scientific instruments. – 1995. – T. 66. – №. 1. – C. 871-876.
- 20.K. Dulon "Optic sensors. Testing the resistance to radiation," ITER Newsline, 2 Jul 2018 [Online]. Available: https://www.iter.org/newsline/-/3062.

- 21.Nehr S. et al. On-line monitoring of multiplexed femtosecond Fibre Bragg Gratings exposed to high temperature and high neutron fluence //Optical Fibre Sensors. Optical Society of America, 2018. C. WF56.
- 22.Cheymol G. et al. Study of Fibre Bragg Grating Samples Exposed to High Fast Neutron Fluences //IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. T. 65. №.
  9. C. 2494-2501.
- 23.A. Morana et al., "Radiation tolerant fibre Bragg gratings for high temperature monitoring at MGy dose levels," Opt. Lett., vol. 39, no. 18, pp. 5313–5316, Sep. 2014
- 24.G. Cheymol, H. Long, J. F. Villard, B. Brichard, "High level gamma and neutron irradiation of silica optical fibres in CEA OSIRIS nuclear reactor," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, no. 4, pp.2252-2258, 2008.
- T. Shikama, T. Kakuta, M. Narui, T. Sagawa, H. Kayano," Optical properties in fibres during irradiation in a fission reactor," J. Nucl. Mater., vol. 225, pp. 324-327, 1995.
- 26. T. Kakuta, T. Shikama, M. Narui, T. Sagawa, "Behavior of optical fibers under heavy irradiation," Fusion Engineering and Design, vol. 41, pp. 201-205, 1998.
- 27. D. W. Cooke, B. L. Bennett, E. H. Farnum, "Optical absorption of neutron-irradiated silica fibres," J. Nucl. Mater., vol. 232, pp. 214-218, 1996.
- B. Brichard, P. Borgermans, A. Fernandez Fernandez, K. Lammens, M. Decréton, "Radiation effect in silica optical fibre exposed to intense mixed Neutron–Gamma Radiation Field," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 48, no. 6, pp. 2069-2073, 2001.
- B. Brichard, A. Fernandez Fernandez, F. Berghmans, M. Decréton, "Origin of the radiation-induced OH vibration band in polymer-coated optical fibres irradiated in a nuclear fission reactor," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, no. 6, pp. 2852-2856, 2002.
- T.Kakuta, et al. "Round-robin irradiation test of radiation resistant optical fibers for ITER diagnostic applications" Journal of Nuclear Materials, Volumes 307-311, Part 2, 1277-1281 (2002).
- A. Morana, S. Girard, M. Cannas, E. Marin, C. Marcandella, P. Paillet, J. Perisse,
   J.-R. Mace, R. Boscaino, B. Nacir, A. Boukenter, Y. Ouerdane, "Influence of

neutron and gamma-ray irradiations on rad-hard optical fiber," Opt. Mater. Express, vol. 5, no. 4., pp. 898-911, 2015. DOI:10.1364/OME.5.000898.

- 32.B. Brichard et al., "Radiation assessment of hydrogen-loaded aluminium-coated pure silica core fibres for ITER plasma diagnostic applications", Fusion Engineering and Design, 82, pp. 2451-2455 (2007).
- 33. J. Stone, Interactions of hydrogen and deuterium with silica optical fibers: a review,J. Lightwave Technol. LT-5 (5) (1987) 712–733.
- 34.A. V. Krasilnikov et al., "Status of ITER neutron diagnostic development", Nuclear Fusion. vol. 45, no. 12, p. 1503, 2005
- 35.G. Keiser, Optical Fiber Communications, McGraw-Hill Internation Editions, 1991.
- 36.G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, Wiley Interscience, 2002.
- 37.Мидвинтер Дж. Э., Волоконные световоды для передачи информации. Изд. Радио и связь 1983 г.
- 38.S. M. Popov, V. V. Voloshin, I. L. Vorobyov, G. A. Ivanov, A. O. Kolosovskii, V. A. Isaev Y. K. Chamorovskii, "Optical loss of metal coated optical fibers at temperatures up to 800° C," Optical Memory and Neural Networks, vol.21, no 1, pp. 45-51, 2012.
- 39.V. V. Voloshin, I. L. Vorob'ev, G. A. Ivanov, V. A. Isaev, A. O. Kolosovskii, S. M. Popov, Yu. K. Chamorovskii ,"Effect of metal coating on the optical losses in heated optical fibers," Technical Physics Letters, vol. 35, no 4, 365-367, 2009.
- 40.A. Méndez, T. F. Morse, (Eds.). Specialty optical fibers handbook. Elsevier. pp.491-510. 2011.
- 41.Бурков В. Д., Иванов Г. А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники. – 2007.
- 42.V. A. Bogatyrjov, S. D. Rumyantsev, C. R. Kurkjian, The effect of temperature on transmission properties of super-high strength aluminium-coated optical fibres. So-viet Lightwave Communications, vol. 2, no. 4, pp. 339-345, 1992.
- 43.Tomashuk A. L. et al. Enhanced Radiation Resistance of Silica Optical Fibers Fabricated in High O2 Excess Conditions //Journal of lightwave technology. 2014. –
  T. 32. №. 2. C. 213-219.

- 44.Долгов И.И., Иванов, Г. А., Чаморовский Ю.К., Яковлев М.Я. Радиационностойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной//Фотонэкспресс. – 2005. – №. 6. – С. 4-10..
- 45.Kashaykin P. F. et al. Radiation-induced attenuation in silica optical fibers fabricated in high O 2 excess conditions //Journal of Lightwave Technology. 2015. –
  T. 33. №. 9. C. 1788-1793.
- 46.Wrobel F. Fundamentals on radiation-matter interaction //New Challeng-es for Radiation Tolerance Assessment, RADECS. – 2005. – C. 19-23.
- 47. Арбузов В. И. Основы радиационного оптического материаловедения //СПб: СПб ГУ ИТМО. – 2008.
- 48.Силинь А. Р., Трухин А. Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO2. – Зинатне, 1985
- 49.Griscom D. L. Nature of defects and defect generation in optical glasses //Radiation Effects on Optical Materials. – International Society for Optics andPhotonics, 1985.
  – T. 541. – C. 38-60.
- 50.S. Girard, Y. Ouerdane, C. Marcandella, A. Boukenter, S. Quenard, and N. Authier, "Feasibility of radiation dosimetry with phosphorusdoped optical fibers in the ultraviolet and visible domain," J. Non-Cryst. Solids, vol. 357, pp. 1871–1874, 2011.
- 51.H. Henschel,M. Körfer, J. Kuhnhenn, U.Weinand, and F.Wulf, "Fibre optic radiation sensor systems for particle accelerators," Nucl. Instrum.Meth. Phys. Res. A, vol. 526, no. 3, pp. 537–550, 2004.
- 52.Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide //Journal of NON-crystalline Solids. 1998. T. 239. №. 1-3. C. 16-48.
- 53.Girard S. et al. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers //Reviews in Physics. – 2019. – T. 4. – C. 100032.
- 54.Griscom D. L. Nature of defects and defect generation in optical glasses //Radiation Effects on Optical Materials. – International Society for Optics and Photonics, 1985. – T. 541. – C. 38-59.

- 55.Skuja, L., Hirano, M., Hosono, H., & Kajihara, K. (2005). Defects in oxide glasses. physica status solidi (c), 2(1), 15-24.
- 56. Vukolov, K. Y., Andreenko, E. N., Orlovskiy, I. I., & Shikalov, V. F. (2019). Irradiation test of fiber optics for H-alpha diagnostics in ITER. Fusion Engineering and Design, 146, 796-799.
- 57.Vukolov K. Y. Fiber optics for plasma diagnostics in ITER //Fusion Engineering and Design. 2017. T. 123. C. 919-922.
- 58.Kyoto M. et al. Gamma-ray irradiation effect on loss increase of single mode optical fibers (I) loss increase behavior and kinetic study //Journal of Nuclear Science and Technology. – 1989. – T. 26. – №. 5. – C. 507-515.
- 59.Chernov P. V. et al. Spectroscopic manifestations of self-trapped holes in silica //Physica Status Solidi B. – 1989. – T. 156. – №. 2. – C. 663-675.
- 60.Zabezhailov M. O. et al. Radiation-induced absorption in optical fibers in the nearinfrared region: the effect of H2-and D2-loading //RADECS 2001. 2001 6th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (Cat. No. 01TH8605). – IEEE, 2001. – C. 192-194.
- 61. 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. T. 65. №. 1-4. C. 392-396.
- 62.Regnier E. et al. Low-dose radiation-induced attenuation at infrared wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibres //IEEE transactions on nuclear science. – 2007. – T. 54. – №. 4. – C. 1115-1119
- Petrie C. M., Birri A., Blue T. E. High-dose temperature-dependent neutron irradiation effects on the optical transmission and dimensional stability of amorphous fused silica //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2019. – T. 525. – C. 119668.
- 64. Petrie C. M. et al. Reactor radiation-induced attenuation in fused silica optical fibers heated up to 1000° C //Journal of Non-Crystalline Solids. 2015. T. 409. C. 88-94.

- 65.W. Primak, "Fast-neutron-induced changes in quartz and vitreous silica," Phys. Rev. B, vol. 110, no. 6, pp. 1240–1254, 1958.
- 66.E. Lell, N. J. Hensler, and J. R. Hensler, J. Burke, Ed., "Radiation effects in quartz, silica and glasses," in Progr. Ceramic Sci., New York, 1966, vol. 4, pp. 3–93, Pergamon
- 67.L.W. Hobbs and X. Yuan, "Topology and topological disorder in silica,"in Defects in SiO and Related Dielectrics: Science and Technology, G. Pacchioni, L. Skuja, and D. Griscom, Eds. Norwell, MA: Kluwer,2000, ch. 2, pp. 37–71
- 68.G. K. Alagashev, A. D. Pryamikov, A. F. Kosolapov, A. N. Kolyadin, A. Y. Lukovkin, A. S. Biriukov, "Impact of geometrical parameters on the optical properties of negative curvature hollow-core fibers," Laser Phys. vol. 25, Art. 055101, 2015.
- 69. Aoyama K. I., Nakagawa K., Itoh T. Optical time domain reflectometry in a single-mode fiber //IEEE Journal of Quantum Electronics. 1981. T. 17. №. 6. С. 862-868.
- 70.https://www.prysmiangroup.com/sites/default/files/business\_markets/markets/downloads/datasheets/Data-Sheet-Super-RadHard-SMF\_2013-04\_0.pdf
- 71.I. A. Bufetov A. F. Kosolapov, A. D. Pryamikov, A. V. Gladyshev, A. N. Kolyadin, A. A. Krylov, Yu. P. Yatsenko and A. S. Biriukov, "Revolver Hollow Core Optical Fibers", Fibers, vol. 6, 39 (2018) doi:10.3390/fib6020039

### Приложение А

### Ампульное устройство

## Патент РК на полезную модель № 4912



108

#### Приложение Б

#### Акт внедрения



071100, Қазақстан Республикасы, Абай облысы, Курчатов каласы, Бейбіт атом көшесі,10 Тел.: 8 (722-51) 2-74-85, коммутатор: 8 (722-51) 2-75-49, 8 (722-51) 2-74-90, с-mail: iac@mnc.kz

31.10. 20 2415 No 01-600-16/1859

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

071100, Республика Казахстан, область Абай, город Курчатов, улица Бейбіт атом,10 Тел.: 8 (722-51) 2-74-85, коммутатор: 8 (722-51) 2-75-49, 8 (722-51) 2-74-90, е-mail: iae@nne.kz

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель директора, PhD В.В. Бакланов 2024 г.

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

### результатов диссертационной работы ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПРИ ГАММА-НЕЙТРОННОМ РЕАКТОРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

на соискание степени кандидата технических наук Гныри Вячеслава Сергеевича

Мы, нижеподписавшиеся, представители филиала Филиала «Институт атомной энергии» РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан»: Коянбаев Е.Т. – заместитель директора по материаловедческим исследованиям, Коровиков А.Г. – главный инженер (PhD), Ерыгина Л.А. – ученый секретарь (PhD), Бакланова Ю.Ю. – начальник отдела материаловедческих испытаний, Мухамедов Н.Е. – начальник отдела разработки и испытаний реакторных устройств (PhD), составили настоящий акт о том, что в ходе выполнения работ в рамках Исполнительного соглашения №1 Договора о сотрудничестве между РГП НЯЦ РК и ИТЭР по теме «Испытания радиационной стойкости волокон и оптоволоконных датчиков для изучения поведения датчиков в условиях ИТЭР» использованы следующие результаты диссертационной работы Гныри В.С.

- Ампульное устройство (АУ), применявшееся для проведения реакторных экспериментов, которое позволило обеспечить требуемые температурные диапазоны и условия вакуума (Патент РК № 4912 от 30.04.2020 года).
- Методика проведения экспериментов, применявшаяся для проведения реакторных испытаний оптических волокон и датчиков на реакторах ИВГ.1М и ВВР-К (Технический отчет №01-600-18/625вн от 30.03.2020 года).
- Внутренний сегмент АУ (Втулка АК.21349.01.011ВО), позволивший разместить до 14-ти объектов испытаний с обеспечением минимального градиента температур (Технический проект АК.21349.00.000TП «Устройство облучательное для испытания оптоволокна»).

Коянбаев Е.Т. Коровиков А.Г. Ерыгина Л.А. Бакланова Ю.Ю. Мухамедов Н.Е.