

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Гныря Вячеслав Сергеевич

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

1.3.8 Физика конденсированного состояния

Работа выполнена в филиале «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» и в «Отделении экспериментальной физики» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: **Тюрин Юрий Иванович**,
доктор физико-математических наук, профессор
отделения экспериментальной физики ИЯТШ
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Официальные оппоненты: **Клопотов Анатолий Анатольевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной механики и
материаловедения федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный
архитектурно-строительный университет»

Михайлов Михаил Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией радиационного и
космического материаловедения федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Томский
государственный университет систем управления
и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «03» сентября 2025 года в «15-00» часов, на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 4, аудитория 245.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте diss.tpu.ru при помощи OR-кода.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.03
доктор технических наук

A handwritten signature in blue ink, located to the right of the text identifying the secretary.

Гынгазов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время, оснащённость ядерных установок оптическими волоконными световодами (то же что и далее «оптическое волокно» или ОВ) и оптоволоконными датчиками на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) является активно растущей тенденцией в атомной промышленности и науке. Уже сейчас разработаны и применяются датчики на основе ВБР для внутриканальных применений в ядерных реакторах. Также использование оптических волокон и датчиков на их основе является активно растущим направлением в развитии систем диагностики термоядерных установок. Применимость ОВ в диагностических системах была уже успешно продемонстрирована на протяжении десятилетий на исследовательских токамаках JET (Joint European Torus) и TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor). В международном термоядерном реакторе ИТЭР больше половины параметров плазмы планируется измерять оптическими и лазерными системами, неотъемлемой частью которых являются ОВ. Кроме ОВ, 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, обладающих высокой радиационной стойкостью вплоть до флюенса быстрых нейтронов $\sim 10^{20}$ н/см².

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

Наиболее радиационно-стойкими являются оптические волокна для видимого диапазона с нелегированной сердцевиной из кварцевого стекла, содержащего молекулярный водород. Однако, насыщение водородом ОВ, работающих в ближнем ИК-диапазоне не приемлемо из-за полос поглощения H₂ на рабочей длине волны 1,55 мкм. Наиболее радиационно-стойкими оптическими волокнами в ближнем ИК-диапазоне являются ОВ с нелегированной и легированной фтором сердцевиной из кварцевого стекла и фторсиликатной светоотражающей оболочкой. Необходимо отметить, что из-за специфики расположения ОВ в ИТЭР приходится использовать специальное высокотемпературное покрытие, которые могут быть выполнены на основе металлов или органических соединений. Ожидаемые рабочие температуры будут лежать в интервале 150-250 °С, в этом диапазоне могут работать ОВ с

полиимидным, алюминиевым и медным покрытиями. Еще одной особенностью является условие работы ОВ в 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.

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

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи**:

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

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:

1. Впервые было исследовано РИП одномодовых оптических волокон с нелегированной сердцевиной и фторированной светоотражающей оболочкой в различных защитных покрытиях (полиимид, алюминий, медь), при смешанном гамма-нейтронном облучении на длине волны 1,55 мкм при потоке быстрых нейтронов $2,39 \cdot 10^{13}$ н/(см² · с), мощности дозы γ -излучения 1570 Гр/с и контролируемом изменении температуры от 150 до 350 °С.

2. 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 полый сердцевинной 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:

1. 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 (внедрено на предприятии).
2. 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 (внедрены на предприятии).
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

1. Длинноволновое радиационно-индуцированное поглощение ($\lambda \geq 1,5$ мкм) зависит от температуры. Увеличении температуры от 200 до 350 °С снижает РИП на ~30 % при поглощенной дозе γ -излучения $2,8 \cdot 10^7$ Гр и флюенсе быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) $4,4 \cdot 10^{17}$ н/см².
2. На длине волны 1,55 мкм РИП света в одномодовых ОВ с нелегированной сердцевинной из чистого кварцевого стекла при поглощенной дозе γ -излучения $2,8 \cdot 10^7$ Гр и флюенсе быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) $4,4 \cdot 10^{17}$ н/см² при температуре облучения 150-350 °С не превышает интервал 0,12-0,16 дБ/м, что говорит о возможности их применения в ядерных и термоядерных установках.
3. 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.

4. 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.

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

В первой главе 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, условия эксперимента. Представлено описание и основные особенности реактора ИВГ.1М, а также экспериментальных установок для исследования РИП на фиксированной длине волны $\lambda=1,55$ мкм и в интервале длин волн 1,1-1,7 мкм.

В третьей 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 ампульного устройства (АУ). В ходе выполнения данной работы были проведены нейтронно-физический расчет с использованием расчетного кода MCNP6 и теплофизический расчет с использованием программного комплекса ANSYS.

В четвертой главе представлены результаты предреакторных исследований температурно-индуцированных оптических потерь и определен их уровень для металлопокрытых ОВ в температурном диапазоне 25-400 °С. Описаны результаты сравнительного исследования РИП в пяти номинально радиационно-стойких одномодовых ОВ и ОВ с поллой сердцевинной различных производителей на длине волны $\lambda=1,55$ мкм в условиях реакторного облучения при максимальном флюенсе быстрых нейтронов ($E>0,1$ МэВ) $4,46 \cdot 10^{17}$ н/см²; и поглощенной дозе $2,91 \cdot 10^7$ 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 ОВ. Также, помимо ОВ с сердцевинной из чистого кварцевого стекла, исследовалось ОВ револьверного типа с поллой сердцевинной, который представляется многообещающим в качестве внутриреакторного транспортного волокна.

Кроме того, представлены исследования спектров РИП в спектральном диапазоне 1,1-1,7 мкм. Установлено отсутствие возрастания полосы поглощения гидроксильных групп на длине волны 1,38 мкм из-за отсутствия диффузии атомов водорода в сердцевину ОВ. В заключении 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, Курчатова, 7-9 сент. 2021 г.». – 2021 г., Курчатова, 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 и вошли в технический отчет для ИТЭР в рамках «Исполнительного соглашения №1 к договору о сотрудничестве между РГП НЯЦ РК и ИТЭР». На ампульное устройство, применявшееся для проведения экспериментов, имеется патент, результаты работы внедрены на предприятии. 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.

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.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии, приложений. Общий объем диссертации – 108 страниц, включая 4 таблицы и 51 рисунок. Библиография содержит 71 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, указана научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описана структура диссертационной работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведено краткое знакомство с объектом исследования – оптическим волокном 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.

Из анализа литературных данных выяснено, что в процессе реакторного облучения в ОВ возникает три основных эффекта: РИП, причиной РИП является образование радиационных центров окраски, поглощающих световой сигнал, который распространяется по ОВ; РИЛ, к которой, в свою очередь, добавляется вклад люминесценции существующих или радиационно-индуцированных центров окраски и радиационно-индуцированного свечения, вызванного черенковским излучением; РИПП, причиной которого в основном является изменение плотности кварцевого стекла при высоких флюенсах. Среди этих явлений основным ограничивающий механизм для интеграции ОВ в различные системы диагностики в ядерных и термоядерных установках является РИП.

Определено, что 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 о 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 в литературе отсутствуют исследования РИЛ в процессе реакторного облучения в одномодовых ОВ в ближнем ИК-диапазоне. 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.

Во **второй главе** приведены основные характеристики исследуемых ОВ. Описаны установки для исследования РИП на фиксированной длине волны 1,55 мкм и спектров РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм. Приведено описание реактора ИВГ.1М, а также общая схема эксперимента. Показано, что характеристики объекта исследования, экспериментальных установок и реактора способны обеспечить условия проведения экспериментов.

Для исследования были выбраны радиационно-стойкие ОВ коммерчески доступные на момент написания диссертационной работы. Одним из важных критериев являлась работоспособность выбранных ОВ при высоких температурах вплоть до 350-400 °С для имитации их работы в различных ядерных и термоядерных установках. Поэтому были выбраны ОВ в высокотемпературном полиимидном и в металлическом (медном и алюминиевом) покрытиях (см. табл.1). Также дополнительно исследовались два ОВ в акрилатном покрытии, применимость которого ограничена температурой до 100 °С (ОВ 6 и 7 в табл.1). Этот выбор был обусловлен тем, что ОВ 6 в отличие от остальных содержал фтор в сердцевине, который может существенно снижать РИП. Однако компания-производитель «Draka» данное ОВ изготавливает только со стандартным акрилатным покрытием.

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

Основные характеристики исследуемых ОВ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых ОВ

№ ОВ	Производитель	Материал покрытия	Толщина покрытия мкм	Толщина фторированной оболочки мкм	Δn	Длина волны отсечки мкм	Оптические потери на 1,55 мкм, дБ/км	Название ОВ
1	ПНППК	полиимид	15	29	0,0090	1,45	0,4	<i>Pol-1</i>
2	ПНППК – НЦВО РАН	алюминий	13	29	0,0090	1,45	7,0	<i>Al</i>
3	НЦВО РАН	медь	20	28	0,0092	1,44	9,0	<i>Cu-1</i>
4	IVG	углерод+медь	20	20	0,0094	1,18	5,0	<i>Cu-2</i>
5	iXblue	полиимид	15	34	~0,009	1,38	0,8	<i>Pol-2</i>
6	Draka	акрилат	50					<i>Acr</i>
7	НЦВО РАН	акрилат	50	-	-	-	~50	<i>HC</i>

На рис. 1 представлены фотографии ОВ с различными покрытиями.



Рис. 1. Фотографии ОВ в различных защитных покрытиях из полиимида, акрилата, алюминия и меди (слева направо).

Для исследования РИП ОВ при реакторном облучении на длинах волн 1,55 и 1,1-1,7 мкм были сконструированы установка, схемы которых изображены на рис. 2.

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

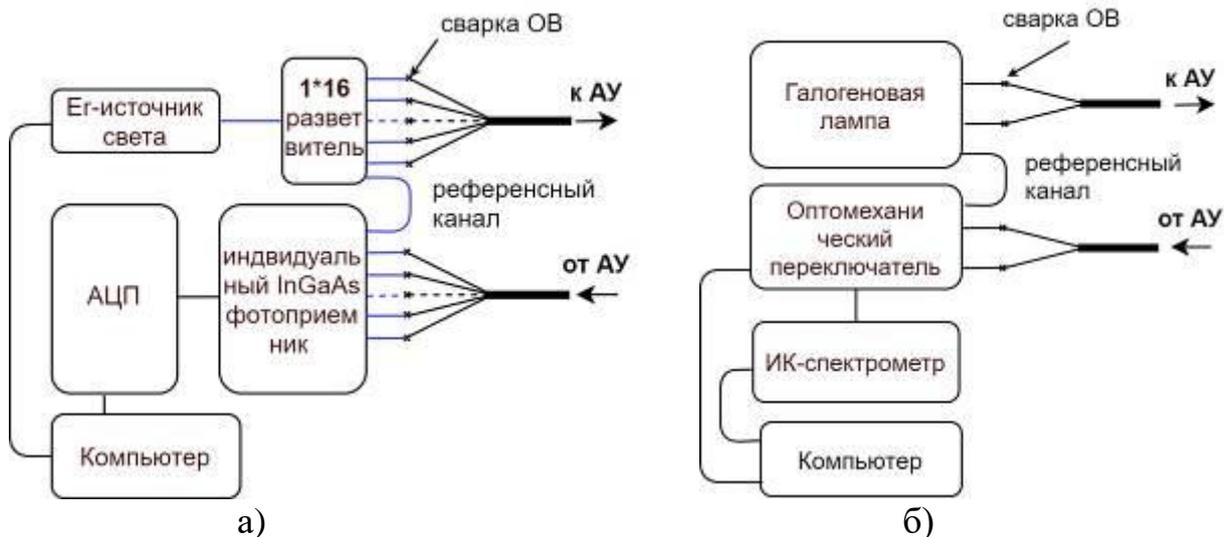


Рис. 2. Блок-схемы установок для исследования РИП на 1,55 (а) и 1,1-1,7 (б) мкм

Для схемы (а) сигнал от эрбиевого суперлюминесцентного источника, прошедший через референсные и исследуемые ОВ, регистрировался с помощью специально разработанного программного обеспечения. До начала и в процессе облучения происходила регистрация сигналов от референсного и исследуемого ОВ. Итоговое РИП на единицу длины рассчитывалось как разница оптических потерь в исследуемом и референсном ОВ, нормированная на длину. В схеме (б) свет от галогеновой лампы HL-2000 проходил через исследуемые и референсные ОВ и регистрировался с помощью спектрометра на линейке диодов InGaAs AvaNIR128 фирмы Avantes в спектральном диапазоне 0,9-1,7 мкм, к которому был подключен оптомеханический переключатель, управляемый компьютером. Для минимизации явления фотообесцвечивания радиационных центров окраса (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 автоматически с заранее заданным временным шагом. Спектры РИП рассчитывались аналогично.

В качестве источника смешанного гамма-нейтронного излучения использовался исследовательский реактор ИВГ.1М. На рисунке 3 представлена упрощенная конструкция исследовательский реактора. В таблице 2 представлены основные характеристики реактора. Испытания проводились в несколько этапов:

- один методический эксперимент с макетами оптоволоконна и температурных датчиков, установленных в прототипе АУ для проверки нейтронно-физических и теплофизических расчетов, для проверки конструктивных решений и работоспособности измерительного оборудования;

- три реакторных эксперимента по испытанию радиационной стойкости оптоволоконна 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.

Всего были проведены три кампании при нижеуказанных условиях.

В первых двух кампаниях ОВ облучались по 2 часа при максимальной фиксированной мощности реактора 6 МВт и температуре 260-280 °С. В третьей кампании ОВ облучались 4 часа при мощности реактора 1 МВт (первые 2 часа

температура была равной 155 °С, вторые 2 часа – 210 °С) и час при мощности 6 МВт и температуре 355 °С.

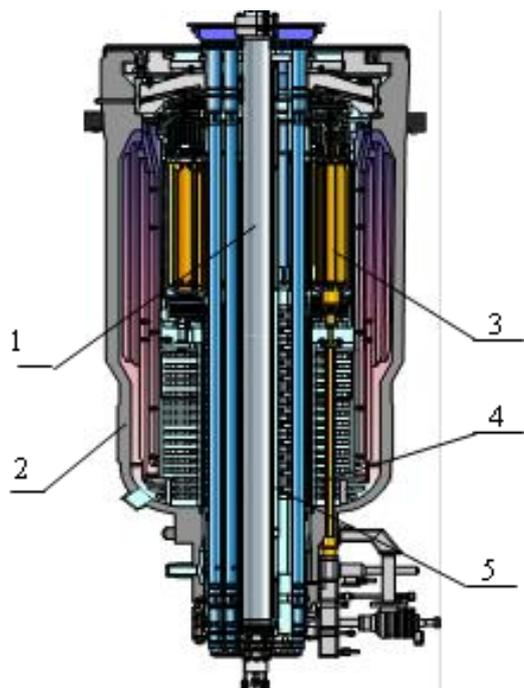


Таблица 2. Характеристики исследовательского реактора ИВГ.1М

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

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

Рис. 3. Схема исследователя реактора ИВГ.1М.

Общая схема эксперимента представлена на рисунке 4.

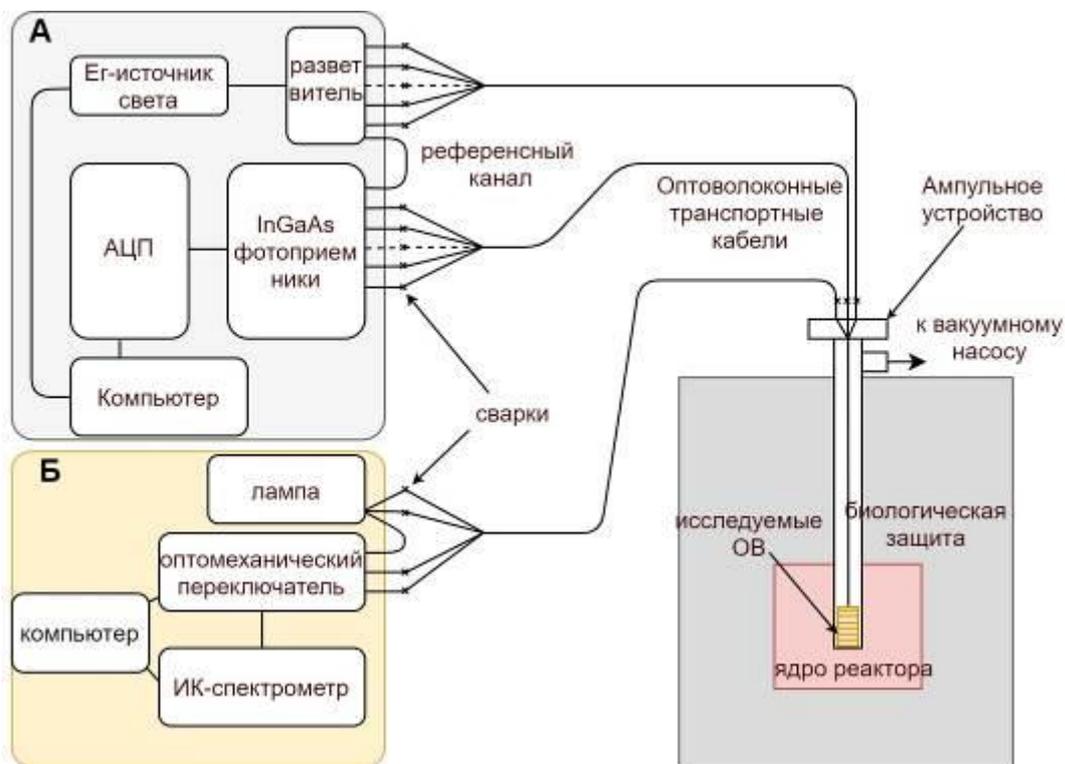


Рис. 4. Общая схема эксперимента

За всё время облучения поглощенная доза, обусловленная γ -облучением, составила $2,91 \cdot 10^7$ Гр (при 1 МВт – $9,36 \cdot 10^6$ Гр, при 6 МВт – $2,81 \cdot 10^7$ 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 $4,46 \cdot 10^{17}$ н/см², при этом поток был равен 10^{12} н/(см²·с) и $2,39 \cdot 10^{13}$ н/(см²·с) при мощностях реактора 1 и 6 МВт соответственно. Общий флюенс нейтронов (включая тепловые с $E < 0,1$ МэВ) за все время облучения составил $3,90 \cdot 10^{18}$ н/см².

В третьей главе приведено описание и адаптирование ОВ и датчиков температуры на основе ВБР, а также экспериментально-измерительного оборудования для проведения облучательных испытаний на реакторе ИВГ.1М. Приведено описание и различные этапы сборки конструкции экспериментального устройства ампульного (АУ). Приводится описание экспериментальных образцов и экспериментально-измерительного оборудования, предназначенных для проведения облучательных испытаний. В ходе выполнения данной работы были проведены нейтронно-физический расчет с использованием расчетного кода MCNP6 и теплофизический расчет с использованием программного комплекса ANSYS. Разработана методика проведения реакторных испытаний радиационно-стойких ОВ и волоконно-оптических ВБР-датчиков температуры в ближнем ИК-диапазоне с *in situ* контролем.

Для проведения испытаний в условиях комбинированного гамма-нейтронного излучения на реакторе ИВГ.1М были отобраны радиационно-стойкие ОВ и волоконно-оптические датчики температуры производителей, согласованных с организацией ИТЭР. Ранее было представлено краткое описание ОВ, предназначенных для проведения облучательных испытаний. 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 ОВ с медным покрытием с одной и с двумя ВБР, внедренные в сэндвич, состоящий из двух металлических пластин толщиной менее 0,5 мм (рис. 5).

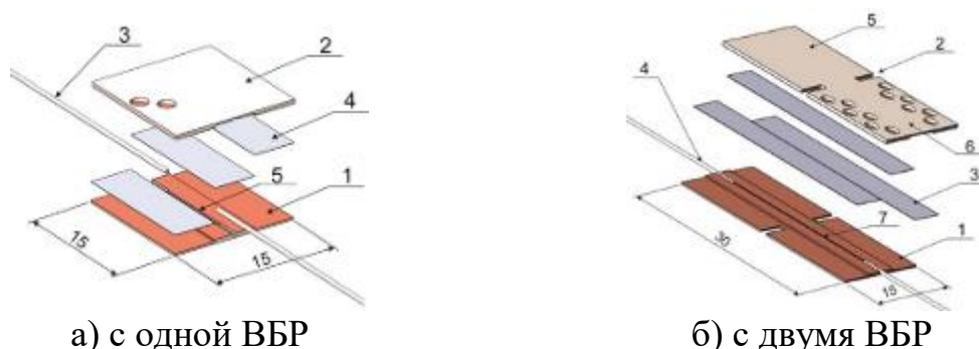


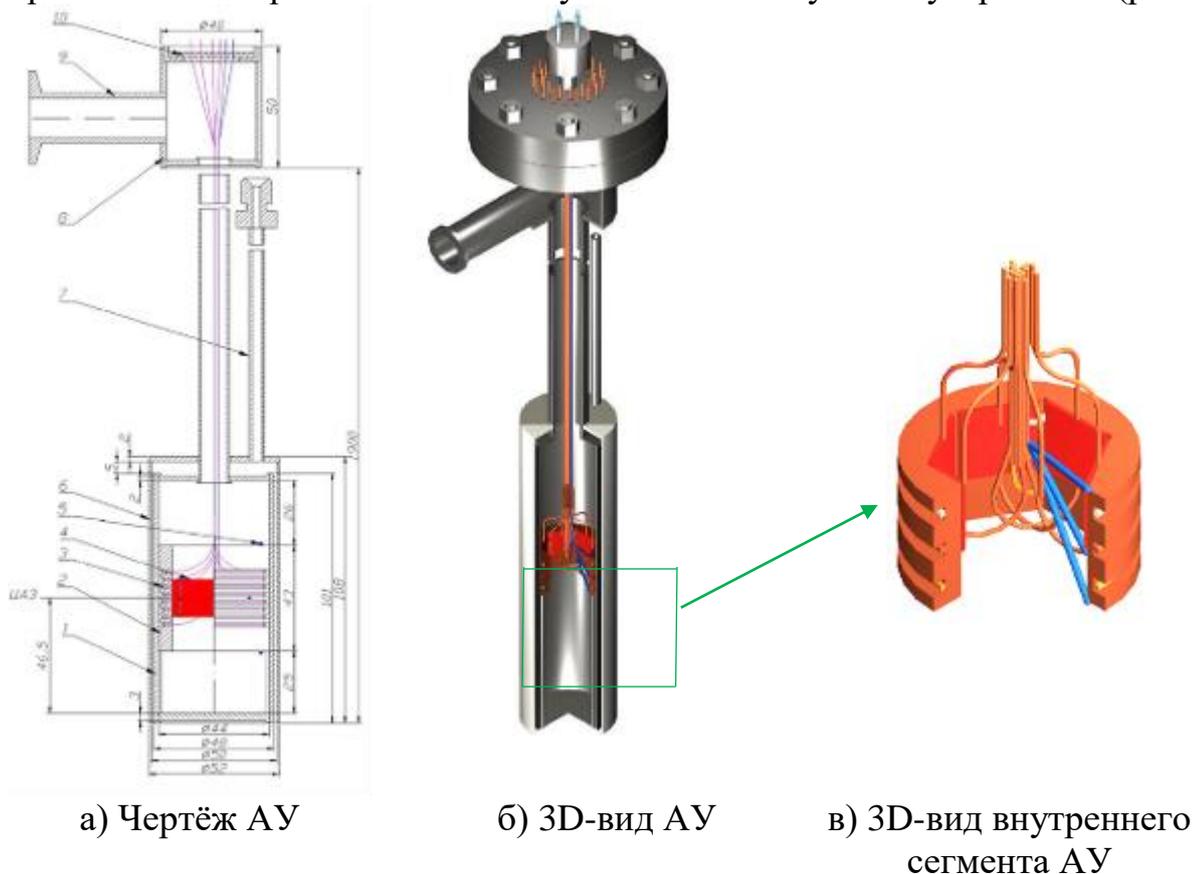
Рис. 5. Устройство ВБР-датчиков

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 (а) 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 (б) 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 (б) 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 $h = 0,3 \pm 0,05$ мм, это необходимо для качественного крепления датчика к поверхности измеряемого объекта методом точечной сварки.

Для проведения испытаний радиационной стойкости ОВ и волоконно-оптических датчиков температуры в условиях комбинированного гамма-нейтронного облучения на стационарном ядерном реакторе ИВГ.1М было разработано экспериментальное облучательное ампульное устройство (рис. 6).



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

Рис. 6. 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 оптоволоконна (с покрытием Cu, Al, акрилата и полиимида) и 8 референсных катушек оптоволоконна, 3 термоэлектрических преобразователя типа ХА; труба, герметично соединенная с ампулой, через которую от внутреннего сегмента ампулы выводятся ОВ и термопары за пределы биологической защиты реактора; внешний узел, соединенный герметично с трубой, на котором монтируется оптоволоконный гермоввод и патрубок для соединения АУ с газо-вакуумной системой реакторного 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 оптоволоконна. ОВ выводится внутрь втулки, для предотвращения повреждения оптоволоконна при изгибе. 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). 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 7.



Рис. 7. Сборка внутреннего сегмента АУ

После произведенного монтажа сегмент был установлен внутрь ампулы, а концы оптоволоконна от установленных образцов и термопар через герметично приваренную к ампуле трубу были выведены в верхнюю часть АУ. 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 оптоволоконна и компенсационных термопарных проводов. 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 было загружено в физический экспериментальный канал реактора

ИВГ.1М, таким образом, чтобы АУ с испытуемыми образцами датчиков и ОВ находился на уровне центра активной зоны реактора. В заключении монтажа термопары и оптоволоконные концы исследуемых образцов были соединены с регистрирующим оптическим оборудованием. На завершающей стадии подготовки к реакторному эксперименту были выполнены необходимые технологические процедуры (откачка, прогрев вакуумных трактов и т.д.).

Одним из важнейших этапов разработки АУ, являлось 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. 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 8), созданная на базе модели реактора ИВГ.1М и расчетной модели экспериментального устройства.

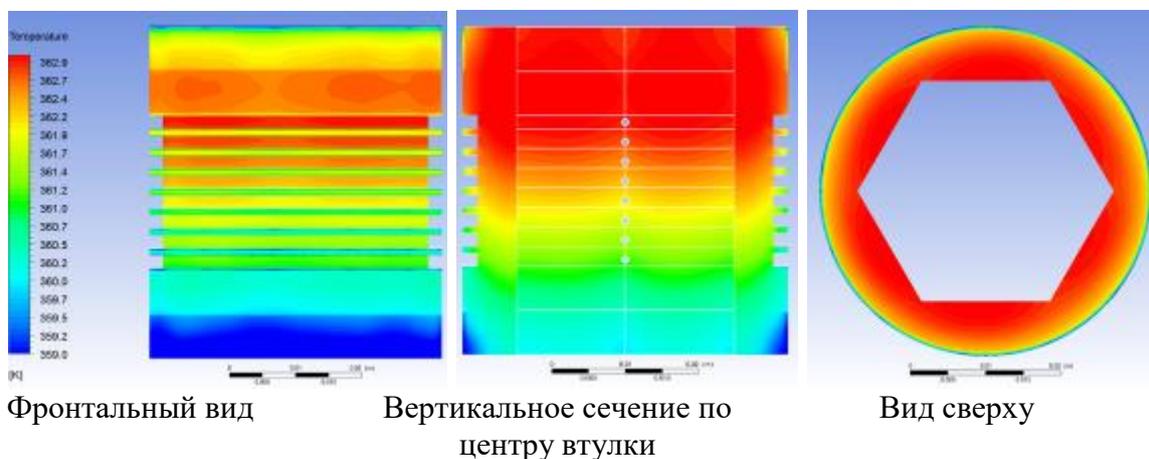


а) Продольное сечение

б) Поперечное сечение

Рис. 8. Объединенная расчетная модель реактора ИВГ.1М и АУ

В результате расчета определены: влияние устройства на реактивность реактора, которая составила $0,37 \pm 0,05 \beta_{эфф.}$ и позволяла произвести пуск с требуемыми параметрами; средний поток тепловых нейтронов в пазах медной втулки – $7,58 \cdot 10^{13}$ н/см³·с; средний поток γ -частиц – $2,77 \cdot 10^{14}$ γ /см³·с. Погрешность расчета энерговыделения в материалах АУ составила менее $0,04 \cdot 10^6$ Вт/м³.



Фронтальный вид

Вертикальное сечение по центру втулки

Вид сверху

Рис. 9. Распределение температуры в медной втулке с расходом азота 100 г/с

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/(м²·К). Распределение температуры в медной втулке представлен на рисунке 9. 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.

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.

Был проведен методический реакторный эксперимент и анализ его параметров (температуры корпуса АУ, температуры внутрикамерного сегмента, вакуумных условий и масс-спектров остаточных газов в АУ и т.п.) зарегистрированных при различных режимах испытаний, сделаны выводы:

- минимальная температура внутреннего сегмента, которая была обеспечена при данной конструкции АУ и системе охлаждения (при максимальном допустимом расходе азота), составила 225 ± 3 °С;
- конструкция АУ позволяет фиксировать температуру внутреннего сегмента на заданном уровне и менять температуру сегмента с шагом 50 °С в интервале от 225 °С до 400 °С;
- показания термопар, установленных на внутреннем сегменте 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 были использованы для проведения дальнейших испытаний радиационной стойкости волокон и оптоволоконных датчиков. Анализ результатов показал, что разработанная конструкция АУ и система измерений позволили проводить регистрацию всех заданных величин в условиях реакторного облучения. Предложенная методика проведения реакторных испытаний была успешно апробирована.

В **четвертой** главе представлены предреакторные исследования изгибных и микроизгибных оптических потерь в температурном диапазоне 25-400 °С, 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.

Проведение предварительных исследований изгибных и микроизгибных оптических потерь в температурном диапазоне 25-400 °С 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 ОВ.

Известно, что при изгибе ОВ возможно появление дополнительных оптических потерь (изгибные потери) из-за туннелирования света из сердцевины через внутреннюю оболочку во внешнюю и «вытекание» света из ОВ. Изгибные потери повышаются при уменьшении радиуса изгиба ОВ. Для всех исследуемых образцов ОВ 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 ОВ, кроме ОВ с полый сердцевиной – *НС*, не возникает дополнительных оптических потерь, связанных с изгибами. ОВ с полый сердцевиной *НС* оказалось более чувствительным к изгибам, что является одной из особенностей данного типа ОВ. Для ОВ *НС* добавочные потери оказались в районе 0,75 дБ на один виток диаметром 40 мм.

Было рассмотрено влияние различных типов намотки (1 – плотная, 2 – свободная) ОВ на медный сегмент и поведение изгибных потерь при повышении температуры.

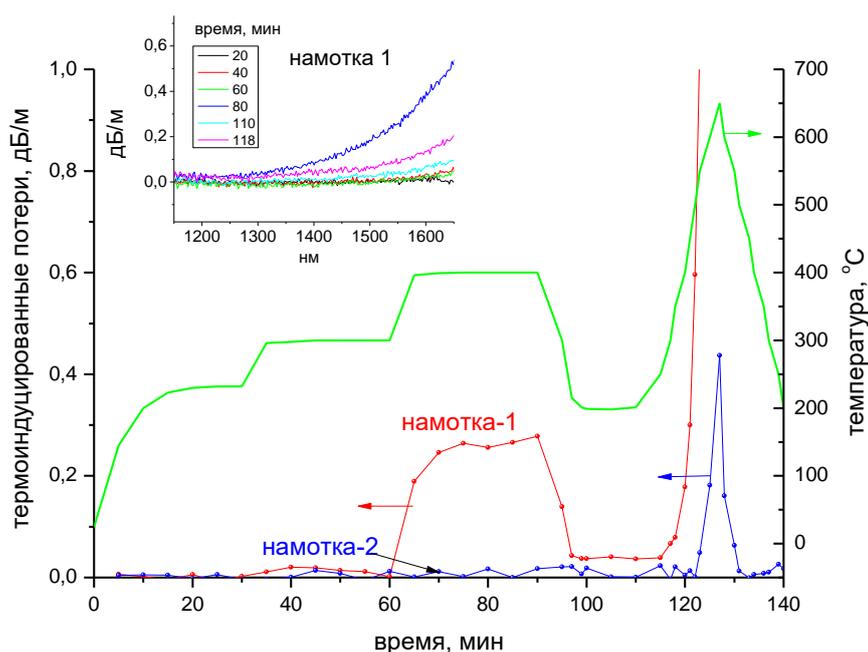


Рис. 10. Термоиндуцированные оптические потери при различных намотках на медную оснастку диаметром 40 мм в зависимости от времени и температуры.

Стоит заметить, что изгибные потери носят обратимый характер, т.е. исчезают при уменьшении температуры (рис. 10), поэтому их можно легко дифференцировать от длинноволнового РИП, которое является высокостабильным.

Предварительные лабораторные исследования позволили выявить возможное уровни и особенности поведения изгибных и микроизгибных оптических потерь в исследуемых ОВ. Из анализа литературных данных, ожидаемый уровень РИП на длине волны $\lambda=1,55$ мкм при флюенсе быстрых нейтронов $\sim 10^{17}$ н/см² был порядка

1-10 дБ/м. Таким образом, суммарные эффекты микроизгибных и изгибных потерь не должны были превышать 10 %. Однако, при анализе зависимостей РИП в процессе облучения и релаксации, полученные значения РИП отличались от литературных примерно на порядок величины в меньшую сторону. Стоит отметить, что проведенные предварительные лабораторные исследования в значительной степени позволили повысить точность нахождения уровня РИП при реакторном облучении.

Исследование зависимости РИП на длине волны 1,55 мкм

На рис. 11 представлены зависимости РИП на длине волны $\lambda=1.55$ мкм исследуемых ОВ от продолжительности реакторного облучения при $T=260$ °С и мощности реактора 6 МВт. Большая 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. Известно, что данное покрытие применимо только до температуры 100-150 °С, а в нашем случае облучение проводилось при температуре $T=260$ °С. По-видимому, это привело к разрушению защитного покрытия, что, в свою очередь, могло сказаться на волноводных свойствах ОВ, например, посредством возникновения микроизгибных потерь.

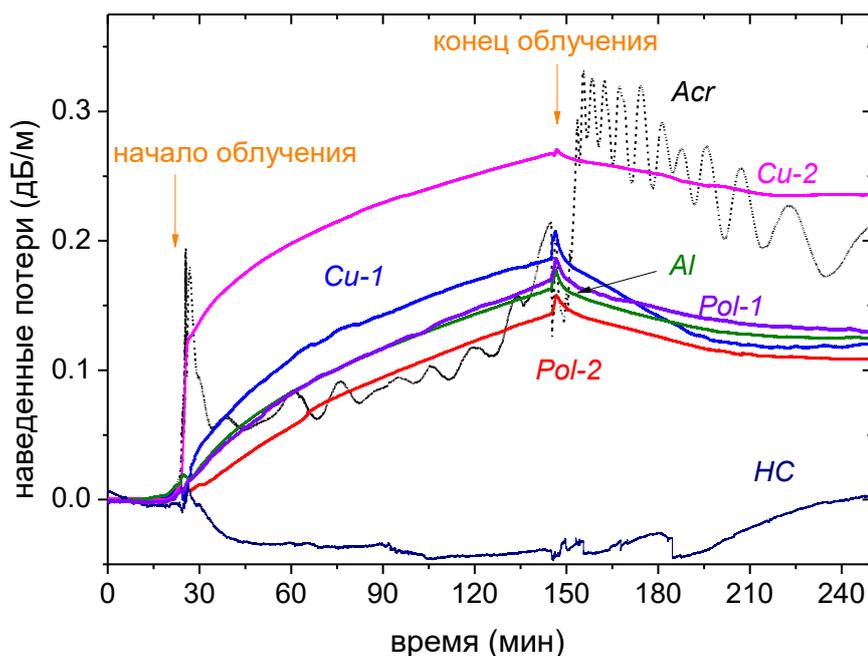


Рис. 11. Зависимость РИП от продолжительности облучения и релаксации. В процессе облучения температура была 260 °С, после облучения температура медленно спадала от 260 до 100 °С. Флюенс и поглощенная доза в конце облучения составили $\Phi_{E>0,1\text{МэВ}}=1,72 \cdot 10^{17}$ н/см² и $D_\gamma=11,3$ МГр соответственно. РИП ОВ *HC* выражено в дБ, а не в дБ/м из-за относительно низкой величины.

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 $E>0,1$ МэВ $\Phi=1,72 \cdot 10^{17}$ н/см². Стоит отметить, что в немногочисленных работах, посвящённых исследованию ОВ при близких к нашим условиям, например, РИП на длине волны $\lambda=1,55$ мкм было

порядка ~ 1 дБ/м, что в 4-5 раз больше, что вероятно связано с большей температурой в нашем случае.

Повышение наведенных потерь при увеличении температуры позволило численно оценить величину изгибных потерь. Увеличение температуры с 260 до 280 °С привело к повышению изгибных потерь на 0,01-0,014 дБ/м во всех ОВ за исключением *Cu-2*. Таким образом, при нормировке на температуру, величина изгибных потерь составляет не более чем $7 \cdot 10^{-4}$ дБ/(м·°С) при $T > 260$ °С. После окончания облучения (150-255 мин) наведенные потери снижаются с понижением температуры. Это снижение объясняется суммой двух эффектов: термический распад РЦО, ответственных за РИП и уменьшение изгибных потерь вследствие сжатия медной оснастки с понижением температуры.

На рис. 12 представлены зависимости РИП на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм исследуемых ОВ и температуры от продолжительности реакторного облучения. ОВ облучались 4 часа при мощности реактора 1 МВт (первые 2 часа температура была равной 155 °С, вторые 2 часа – 210 °С) и один час при мощности 6 МВт и температуре 355 °С. После трех пусков реактора поглощенная доза составила $D_\gamma = 2,91 \cdot 10^7$ Гр, а суммарный флюенс $\Phi = 4,46 \cdot 10^{17}$ н/см².

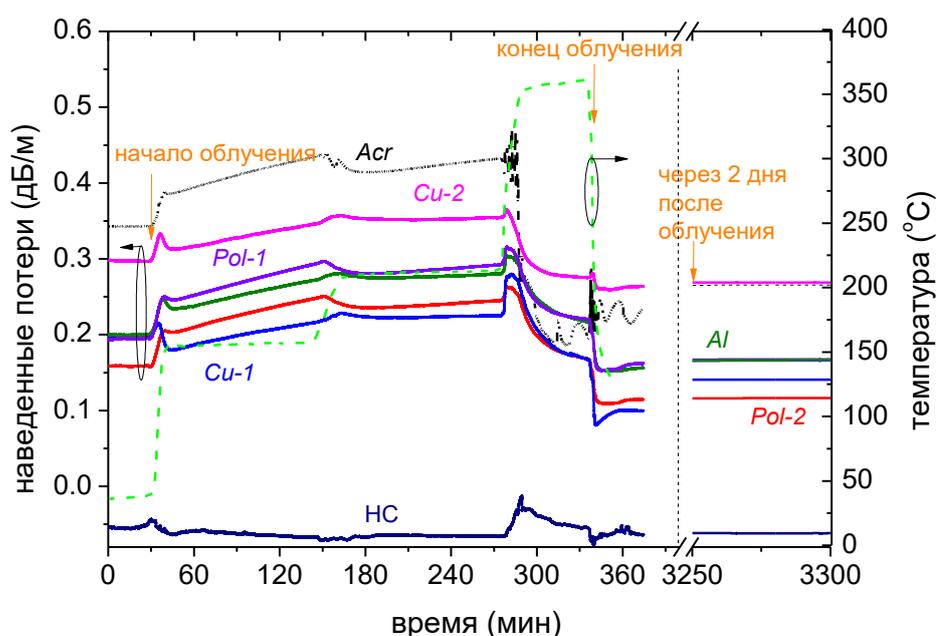


Рис. 12. Зависимости РИП на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм и температуры исследуемых ОВ от продолжительности реакторного облучения. ОВ облучались 4 часа при мощности реактора 1 МВт (первые 2 часа температура была равной 155 °С, вторые 2 часа – 210 °С) и час при мощности 6 МВт и температуре 355 °С. Общая поглощенная доза в конце облучения составила $2,91 \cdot 10^7$ Гр (при 1 МВт – $9,36 \cdot 10^6$ Гр, при 6 МВт – $2,81 \cdot 10^7$ Гр) Флюенс быстрых нейтронов с энергией $E > 0,1$ МэВ составил $\Phi = 4,46 \cdot 10^{17}$ н/см². 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.

До начала облучения во временном интервале 0-30 мин можно 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 *Cu-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*. 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.

Повышение мощности реактора до 6 МВт и температуры до 355 °С приводит, во-первых, к резкому росту изгибных потерь. Скачок изгибных потерь для ОВ *Cu-2* наименьший среди всех одномодовых ОВ (рис. 12), аналогично изгибные потери вели себя и при первом пуске для данного ОВ (рис. 11). Данное поведение, по-видимому, связано с наиболее свободной намоткой этого ОВ, что привело к уменьшению изгибной чувствительности при повышении температуры из-за термического расширения медной оснастки, на которой располагались исследуемые ОВ. Основываясь на оценке изгибных потерь, сделанных по результатам первого пуска, мы определили, что повышение температуры до 355 °С должно приводить к повышению изгибных потерь не более чем на 0,07 дБ/м. Примерно на эту величину и происходит уменьшение наведенных потерь для всех ОВ, кроме *Cu-2*, после окончания облучения (340 мин на рис. 12).

При облучении на мощности реактора 6 МВт происходит спад РИП, что обусловлено более интенсивным процессом термического распада РЦО при температуре 355 °С. Интересно, что выдержка в течение одного часа при этой температуре приводит к уменьшению РИП до уровня до начала третьего пуска (на ~30%, рис. 12). 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 3).

Таблица 3. РИП в ОВ на длине волны 1,55 мкм через 2 дня релаксации

№	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	Acg	0,27
6	Pol-2	0,12
7	НС	-0,06 дБ

* РИП без учета скачка наведенных потерь в начале первого пуска (рис. 11)

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

Для ОВ *Pol-1*, кроме исследования зависимости РИП от продолжительности облучения, происходила регистрация спектров РИП в диапазоне длин волн 1,1-1,7

мкм. На рис. 13 приведены спектры РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм, зарегистрированные в процессе третьего облучения.

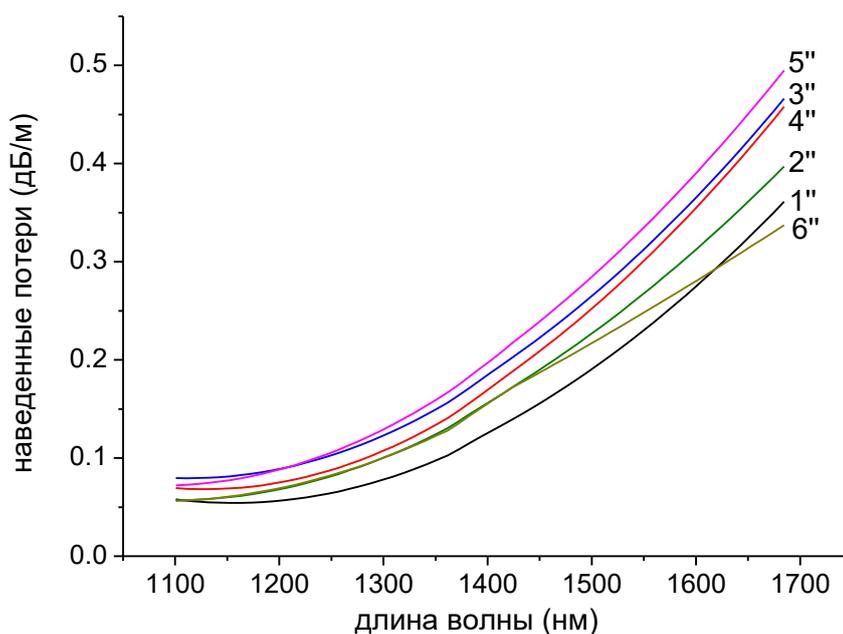


Рис. 13. Спектры РИП в диапазоне 1,1-1,7 мкм, зарегистрированные в процессе третьего облучения. Спектр 1'' соответствует поглощенной дозе $D_\gamma=22,6$ МГр, флюенсу $\Phi_{E>0,1 \text{ MeV}} = 3,44 \cdot 10^{17}$ н/см² и температуре $T=25$ °С; спектр 2'' – $D_\gamma=22,9$ МГр, $\Phi_{E>0,1 \text{ MeV}} = 3,47 \cdot 10^{17}$ н/см², $T=155$ °С; спектр 3'' – $D_\gamma=23,1$ МГр, $\Phi_{E>0,1 \text{ MeV}} = 3,51 \cdot 10^{17}$ н/см², $T=155$ °С; спектр 4'' – $D_\gamma=23,3$ МГр, $\Phi_{E>0,1 \text{ MeV}} = 3,54 \cdot 10^{17}$ н/см², $T=210$ °С; спектр 5'' – $D_\gamma=23,6$ МГр, $\Phi_{E>0,1 \text{ MeV}} = 3,58 \cdot 10^{17}$ н/см², $T=350$ °С; спектр 6'' – $D_\gamma=29,1$ МГр, $\Phi_{E>0,1 \text{ MeV}} = 4,46 \cdot 10^{17}$ н/см², $T=350$ °С.

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 $\lambda=1,38$ 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 ОВ с малой толщиной светоотражающей оболочки ~ 10 мкм, а в этой работе мы исследовали одномодовые ОВ 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 ОВ.

Исследование радиолуминесценции в процессе облучения

Как было описано в разделе 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. Возможно, что РИЛ выходил за динамический диапазон, так, например, в некоторых работах – РИЛ в ближнем ИК-диапазоне для многомодовых ОВ не превышал ~ -70 дБм.

Выбранные в работе ОВ имели практически все возможные термостойкие покрытия из: полиимида, алюминия и меди. ОВ с медным покрытием были исследованы в жестких радиационных условиях впервые. Были проведены предварительные исследования температурно-индуцированных потерь и определен их уровень для металлопокрытых ОВ для температурного диапазона 25-400 °С.

Максимальный флюенс быстрых нейтронов составил $\Phi = 4,46 \cdot 10^{17}$ н/см²; γ -доза = $2,91 \cdot 10^7$ 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, также ОВ облучались в условиях вакуума в течение всей кампании.

Во всех ОВ, кроме радиационно-индуцированных потерь проявился эффект 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 °С изгибные потери не появлялись, при более высокой температуре изгибные потери не превышали $\sim 7 \cdot 10^{-4}$ дБ/(м·°С), как следует из 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 ОВ. 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 ОВ показали сравнимые радиационно-индуцированные потери на длине волны $\lambda=1,55$ мкм – 0,12-0,16 дБ/м. Если скорректировать потери ОВ с медным покрытием из-за необратимого роста микроизгибных потерь, продемонстрированного сразу при повышении температуры до 260 °С, 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 ОВ.

Помимо ОВ с сердцевиной из чистого кварцевого стекла исследовалось ОВ револьверного типа с полый сердцевиной. Оно показало практически нулевое РИП на длине волны $\lambda=1,55$ мкм в процессе всего облучения. Несмотря на чувствительность к изгибу, ОВ с полый 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, не наблюдался эффект 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 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 °С 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 $2,39 \cdot 10^{13}$ н/(см²·с) нет паразитного вклада радиолюминесценции на детектируемом уровне сигнала выше -60 дБм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. 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.
2. 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 гамма-нейтронном облучении сильно зависит от температуры. При увеличении температуры от 200 до 350 °С РИП снижается на ~30 % при поглощенной дозе $2,8 \cdot 10^7$ Гр и флюенсе быстрых нейтронов $4,4 \cdot 10^{17}$ н/см².

4. 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.
5. 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 $2,81 \cdot 10^7$ Гр и флюенсе быстрых нейтронов $4,46 \cdot 10^{17}$ н/см² 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 основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

5 научных работ, в том числе 1 статья в изданиях рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в изданиях входящих в перечень Scopus и Web of Science, получен патент Республики Казахстан.

1. A technique for conducting of reactor in-situ tests of optical fibres and FBG-sensors intended for in-vessel applications in thermonuclear facilities
Gnyrya V.S., Tyurin Y.I., Kashaykin, P.F., ... Tolonova, A.U., Shaimerdenov, A.A.
Fusion Engineering and Design 2023, 191,113787
2. Experimental device design justification for radiation resistance tests of single-mode optical fibers and FBG-based sensors at the IVG.1M reactor
Gnyrya, V., Gordienko, Yu., Surayev, A., ...Tulubayev, Ye., Bochkov, V.
Journal of Physics: Conference Series 2022, 2155(1), 012019
3. Radiation Resistance of Single-Mode Optical Fibers at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ under Irradiation at IVG.1M Nuclear Reactor
Gnyrya, V., Kashaykin, P.F., Tomashuk, A.L., Vasiliev, S.A.,...Zarenbin, A.V., Semjonov, S.L.
IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(10), стр. 2162–2171, 9177171
4. Neutronics Model of the IVG.1M Reactor: Development and Critical-State Verification
Gnyrya, V.S., Irkimbekov, R.A., Zhagiparova, L.K., Kotov, V.M., Vurim, A.D.
Atomic Energy, 2019, 127(2), стр. 69–76
5. Нейтронно-физическая модель реактора ИВГ.1М: разработка и верификация по критическому состоянию
Гныря В.С., Жагипарова Л.К., Иркимбеков Р.А., Котов В.М., Вурим А.Д.
Атомная энергия, 2019, 2(8), стр. 63-68
Патент Республики Казахстан
6. Патент РК № 4912 от 30.04.2020 г. Ампульное устройство для исследования тритийгенерирующих материалов; Гныря Вячеслав Сергеевич, Понкратов Юрий Валентинович, Скаков Мажын Канапинович, Барсуков Николай Иванович, Гордиенко Юрий Николаевич, Заурбекова Жанна Асхатовна, Карамбаева Индира Сергазыевна.