

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук

РЕФЕРАТ - ПРЕЗЕНТАЦИЯ

Создание радиационно-стойких средств контроля режимов работы
и диагностики состояния энергетического ядерного реактора
на основе новых волоконно-оптических технологий

№	Ф.И.О. авторов, ученые степени и звания, должности по основному месту работы
1.	Бутов Олег Владиславович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (руководитель работы)
2.	Базакуца Алексей Павлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории, ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
3.	Бирюков Алексей Николаевич, начальник отдела, АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала»
4.	Ложников Игорь Николаевич, заместитель главного инженера по безопасности и надежности, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская атомная станция»
5.	Никитов Сергей Аполлонович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор, ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
6.	Строганов Андрей Алексеевич, заместитель начальника отдела ядерной безопасности и надежности, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Курская атомная станция»
7.	Увакин Александр Владимирович, главный инженер, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Курская атомная станция»
8.	Федоров Артем Николаевич, заместитель директора по научно-исследовательской работе, ООО «Пролог»
9.	Чаморовский Юрий Константинович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории, ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
10.	Шевцов Игорь Александрович, директор, ООО «Пролог»

Краткое изложение содержания работы.

В работе представлены новые достижения в области оптического материаловедения, технологии волоконных световодов, волоконно-оптической сенсорики, радиационной стойкости оптических материалов. Разработана технология отечественных радиационно-стойких волоконных световодов и волоконно-оптических датчиков на их основе. Результаты научных и технологических изысканий нашли практическую реализацию в виде контрольно-измерительного комплекса ИКС-49, способного работать в активной зоне ядерного реактора. Впервые была обеспечена возможность высокоточного измерения геометрии конструкции реактора в столь жестких условиях эксплуатации. Система не имеет мировых аналогов и является полностью уникальной разработкой авторского коллектива. Внедрение системы на Ленинградской, Курской, Смоленской АЭС позволило решить важную отраслевую задачу повышения безопасности, сокращения сроков плановых предупредительных ремонтов, отработки технологии восстановления ресурсных характеристик реакторной установки типа РБМК, что обеспечило значительный экономический эффект в масштабах страны. Кроме того, задел и результаты, полученные при проведении работ, открывают широкие перспективы для их дальнейшего внедрения в атомной и нефтедобывающей отраслях, авиации и космонавтике, военной промышленности.

Основная научно-техническая идея.

Контроль безопасного функционирования ядерных установок во многих случаях требует установки датчиков в зонах с высоким уровнем ионизирующего излучения, в непосредственной близости к активной зоне реактора. Так, например, одной из актуальных задач является контроль деформации технологических каналов в графитовой кладке реакторов РБМК-1000, которые составляют практически половину парка энергетических реакторов РФ. Реактор типа РБМК относится к канальному типу реакторов и представляет собой графитовую кладку с вертикальными технологическими каналами, в которых размещено ядерное топливо

в виде тепловыделяющих сборок и элементы системы управления защиты реактора. Деформация графитовой кладки в результате длительного облучения является критическим параметром, определяющим состояние каналов и возможность дальнейшей эксплуатации реактора. Особую актуальность задача контроля деформации приобретает в период продленного срока эксплуатации ядерного реактора, когда возможное искривление графитовой кладки может достигать предельно допустимых значений. Величина изгиба каналов является важнейшим параметром, подлежащим эксплуатационному контролю.

Основными факторами, ограничивающими возможность применения средств контроля и измерения в активной зоне реакторов РБМК являются высокий (до 400 °С) уровень температуры и экстремально высокий уровень ионизирующего излучения, включающего потоки нейтронов и гамма-частиц.

В данной работе представлены результаты по разработке принципиально новой контрольно-измерительной волоконно-оптической системы, не имеющей аналогов в мире, которая была оптимизирована для проведения измерений профиля технологических каналов реактора РБМК-1000. Разработка стала возможной благодаря внедрению новых технологий производства радиационно-стойких волокон и волоконных сборок, а также разработке и оптимизации оригинальных технологических решений по созданию волоконных брэгговских структур в сложных волоконных сборках.

Ключевой особенностью конструкции нового датчика изгибных деформаций, лежащего в основе новой контрольно-измерительной системы, является специально разработанный цельный стержень-световод из кварцевого стекла с внешним диаметром 2,1 мм, который содержит 4 световедущие одномодовые сердцевинки, расположенные по периметру сечения. Роль датчиков деформаций выполняли т.н. брэгговские решетки, записанные в сердцевинах. Такие брэгговские датчики могут быть объединены в массивы путем их мультиплексирования по длине волны, что позволяет создавать квазираспределенные системы измерения. В представленной конструкции по длине стержня было записано по 20 групп датчиков с шагом 0,5 м. Конструкция датчика позволяет устанавливать стержень непосредственно в

центральный канал тепловыделяющей (топливной) сборки, полностью повторяя геометрический профиль технологического канала. Благодаря высокой радиационной стойкости световода и брэгговских элементов датчик способен работать длительное время в условиях активной зоны ядерного реактора.

Структура стержня с записанными решетками показана на рисунке 1б.

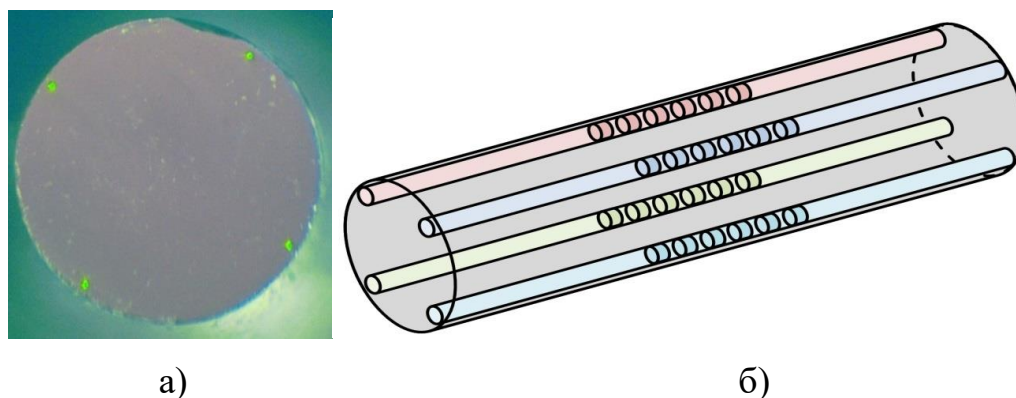


Рисунок 1 – Торец волоконной сборки с четырьмя сердцевинами (а) и структурная схема участка сборки с брэгговскими решетками (б).

Датчик работает по дифференциальной схеме измерений, что позволяет компенсировать влияние температуры и ионизирующего излучения на показания датчика. На рисунке 2 схематично представлено сечение световода с четырьмя сердцевинами, демонстрирующее принцип расчета величины и направления изгиба по показаниям брэгговских датчиков. Вектор \mathbf{F} указывает направление воздействия на датчик.

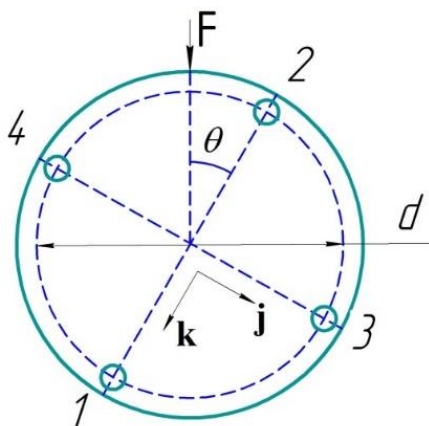


Рисунок 2 – Схема воздействия на датчик.

В общем случае величина и направление деформации, а именно кривизна κ для четырехсердцевинного датчика может быть вычислена по общей формуле (1):

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \cos \theta \mathbf{j} + (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot \sin \theta \mathbf{k}}{d} \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и ε_4 – величины относительных деформаций решеток, расположенных в сердцевинах 1, 2, 3 и 4 соответственно, а единичные векторы \mathbf{j}, \mathbf{k} совпадают с осями сердцевин 2-1 и 4-3 соответственно.

В 2017 году была внедрена контрольно-измерительная система ИКС-49, обеспечивающая проведение измерений без выгрузки топлива на остановленном (расхоложенном) реакторе. С 2017 года ведется опытно-промышленная эксплуатация высокотемпературной версии ИКС-49, позволяющей проводить измерения непосредственно на работающем реакторе.

Описание результатов и их значение для практики.

По результатам измерений системой ИКС-49, выполняемых в короткий срок (2-3 рабочих смены), определяется текущее состояние графитовой кладки, строится план и объем требуемых операций для восстановления ресурсных характеристик графитовой кладки. Применение системы ИКС-49 значительно сократило объем выгружаемых/перегружаемых топливных сборок, тем самым сократило время ремонтной кампании и снизило дозовую нагрузку на персонал АЭС.

После завершения опытно-промышленной эксплуатации высокотемпературный вариант системы позволит получить информацию о состоянии графитовой кладки до останова энергоблока на ремонт, что позволит ещё более сократить длительность простоя энергоблока в ремонте, а гласное - изменить процедуру планирования ремонтов и перейти от расчетного обоснования эксплуатационных ограничений к принятию решения по результатам прямых измерений.

Объемы внедрения.

Система ИКС-49 в варианте для работы на расхолаженном реакторе используется на всех блоках АЭС с реакторами РБМК-1000, а именно, на Курской, Ленинградской, Смоленской АЭС. С 2019 года ведется опытно-промышленная эксплуатация высокотемпературного варианта системы ИКС-49.

Достигнутый экономический и/или социальный эффект от внедрения.

Сокращение сроков ремонтов путем сокращения объема операций, стоящих на критическом пути графика ремонта, необходимых на выгрузку/загрузку тепловыделяющих сборок из активной зоны на 10-14 дней на каждом ремонте каждого энергоблока с реактором РБМК-1000. В ценах 2019 года благодаря использованию внедренной системы ИКС-49 приносит дополнительную выручку от продажи электроэнергии от 350 до 500 млн. руб./ремонт. С 2017 по 2020 год ИКС-49 была использована на 20 ремонтах. До конца 2035 года на действующих блоках запланировано проведение примерно 65 ремонтов, следовательно, дополнительная выручка благодаря применению ИКС-49 составит более 23 млрд. руб.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения высокотемпературного варианта ИКС-49 или аналогичной по параметрам системы приведет к сокращению каждого ремонта еще на 2-е суток, что может дополнительно сэкономить до 3 млрд. руб. до 2035 года.