

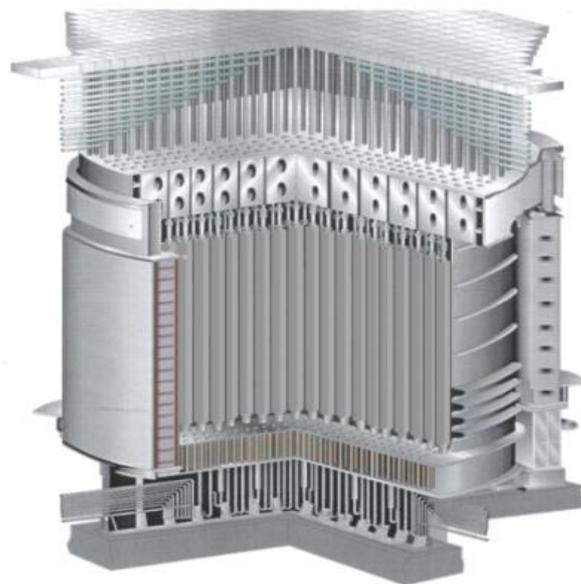
Краткое содержание работы.

Представлены новые достижения авторского коллектива в науке и производстве для контроля и обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии и средств измерения их критических параметров. Результаты работы основаны на научных разработках авторов в области волоконной оптики, материаловедения, технологий создания оптических субмикронных структур и в полной мере соответствуют современному мировому уровню развития науки и техники, а в ключевых аспектах работы являются флагманскими. Разработана технология изготовления отечественных радиационно-стойких оптических волокон и датчиков на их основе. В экстремальных радиационных и температурных условиях эксплуатации внутри активных зон работающих ядерных реакторов реализован принципиально новый метод контроля и измерения изгибных деформаций. Решена уникальная задача, позволяющая использовать оптоволоконные системы при экстремально высоком уровне ионизирующего излучения и температурах в 400 и более градусов Цельсия. Разработана и внедрена система ИКС-49 для измерения профиля топливных каналов реакторов РБМК, не требующая при проведении измерений выгрузки тепловыделяющих (топливных) сборок. Система, изготавливаемая в России, не имеет мировых аналогов и является уникальной разработкой авторского коллектива. Внедрение системы на всех 11 энергоблоках АЭС России с реакторами РБМК – Ленинградской, Курской, Смоленской, позволило решить ключевые задачи повышения безопасности, сокращения сроков восстановительных ремонтов, совершенствования технологии восстановления ресурса реакторов и повышения экономичности энергоблоков, что способствовало возможности дальнейшего продления сроков безопасной эксплуатации семи энергоблоков РБМК-1000 второго поколения до 50 лет (Решение ГК «Росатом» №Р1.1.1.06.001.0193-2022 от 25.02.2022.) и, соответственно, способствовало укреплению энергетической безопасности нашей страны. Полученные научные результаты и положительный опыт внедрения метода в производство позволили разработать сенсорные системы для нужд промышленности, в том числе в рамках текущего Гособоронзаказа и открывают

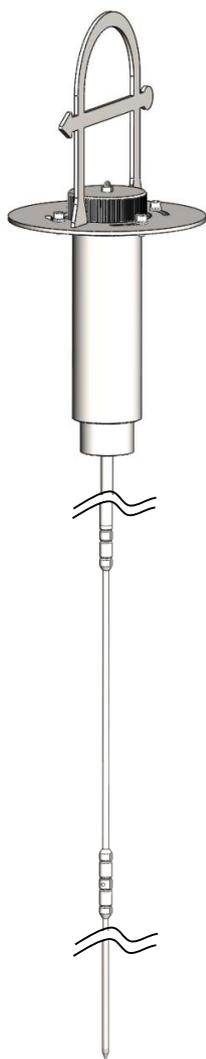
широкие перспективы для их дальнейшего внедрения в атомной отрасли, авиации и космонавтике, строительстве, нефтегазовом секторе, машиностроении, геодезии, оборонной промышленности.

Основная научно-техническая идея.

Реактор РБМК представляет собой графитовую кладку с вертикальными каналами, в которых размещено ядерное топливо в виде тепловыделяющих сборок и элементы системы управления и защиты реактора. Деформация графита кладки реактора в результате радиационного и теплового воздействия является процессом,



Конструкция реактора РБМК



ИКС-49

влияющим на состояние каналов и в целом возможность дальнейшей эксплуатации реакторов. Для обеспечения работоспособности энергоблоков необходим надежный измерительный контроль состояния элементов конструкции реакторов, на основе которого определяется объем восстановительных работ, позволяющий продолжить их безопасную эксплуатацию. Основными факторами, ограничивающими применение средств контроля и измерения в активной зоне, являются необходимость проведения ядерно-опасных работ по выгрузке ядерного топлива из каналов реактора, высокий уровень температуры и ионизирующего излучения, включающего потоки высокой плотности гамма-квантов и нейтронов.

В работе представлен принципиально новый, разработанный и реализованный авторами, метод измерения геометрии каналов реакторов РБМК-1000. Основная научно-техническая идея заключается в способе измерения параметров деформированной

конструкции реактора оригинальным методом, с использованием радиационно- и термически стойкого волоконно-оптического датчика изгибных деформаций на основе брэгговских решеток, записанных в специальном стержне-световоде особой конструкции. Научная идея получила свою реализацию в виде радиационно-стойкой измерительной системы ИКС-49, способной работать в условиях активной зоны реактора и обеспечивать измерения без выгрузки топливных кассет.



Структурное изображение участка волоконного датчика

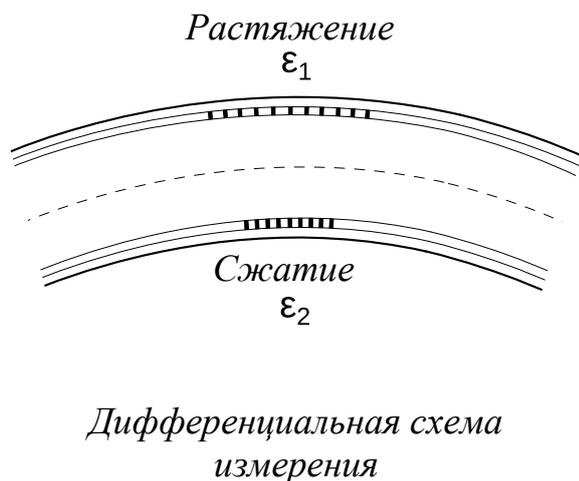
Ключевой особенностью конструкции датчика деформаций, является специально разработанный цельный стержень-световод из кварцевого стекла с внешним диаметром 2,1 мм, который содержит 4 световедущие сердцевинки, расположенные по периметру сечения. Роль датчиков

деформаций выполняют брэгговские решетки, записанные в сердцевинках. 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 центральную несущую трубку тепловыделяющей сборки (ТВС). Благодаря высокой радиационной стойкости световода и брэгговских элементов датчик способен работать длительное время в условиях активной зоны ядерного реактора.



Конструкция ТВС

Датчик работает по дифференциальной схеме измерений, что позволяет компенсировать влияние температуры и ионизирующего излучения на его



показания. Четыре сердцевинки датчика обеспечивают надежное измерение по двум направлениям изгиба. При этом 20 групп брэгговских датчиков, расположенных по длине стержня, позволяют с высокой точностью отслеживать даже сложную форму изгибов с высоким пространственным разрешением и высокой точностью по величине изгибной деформации.

Описание результатов и их значение для практики.

Впервые на практике в атомной энергетике реализовано решение, позволяющее в реальном времени с заданной погрешностью измерять перемещения и деформации элементов активной зоны при нормальной эксплуатации реактора и тем самым подтвердить выполнение соответствующих требований НП-082-07 (правила ядерной безопасности атомных станций). Решение реализовано для АЭС с РБМК, но принцип работы системы, её технические характеристики и малые габариты датчиков позволяют использовать систему с минимальными изменениями на АЭС любого дизайна.

Особенно актуальным их применение следует рассматривать на атомных станциях малой мощности (АСММ), интерес к проектированию и строительству которых растет во всем мире. По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), в настоящее время разрабатывается около 70 концепций АСММ. Так как АСММ проектируются, как правило, для отдаленных регионов, основными принципами, заложенными в их конструкцию, являются высокий уровень пассивной безопасности и высокая степень автономности при эксплуатации. Применение апробированных на АЭС с РБМК оптоволоконных систем или их модификаций, адаптированных к поставленной задаче в составе АСММ, позволит отслеживать в онлайн режиме состояние элементов активной зоны и планировать выполнение ремонтных работ на энергоблоке.

Аналогичные проблемам РБМК-1000 трудности, влияющие на безопасную эксплуатацию установок, встречаются и на других АЭС канального дизайна – газоохлаждаемых уран-графитовых установках (AGR, Великобритания, и современных HTGR, Китай), для которых основной проблемой является деформация графитовых конструкций активной зоны, и тяжеловодных канальных реакторах типа CANDU (Канада, Индия, Аргентина, Южная Корея, Румыния и Китай), где основной задачей является



ИКС-49

прогнозирование и контроль состояния топливных каналов и топлива при воздействии нейтронного облучения и высоких температур. Кроме того, контроль деформации внутриреакторного оборудования с целью своевременного выявления отклонения параметров активной зоны может быть актуален при продлении срока эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР и БН.

Система не имеет аналогов в мире!

Применение оптоволоконной оптической системы (или внедрение такой системы на этапе проектирования систем безопасности) позволит как значительно повысить безопасность РУ, так и существенным образом оптимизировать межремонтный интервал для энергоблоков.

Освоенные, вновь созданные технологические процессы и измерительные приборы являются базовыми и универсальными технологиями для оптоволоконной сенсорики. Уникальность, надежность, универсальность и высокая точность

предложенного и реализованного в ИКС-49 метода измерений позволяют использовать его и разработанную на его основе измерительную систему как на других ядерных объектах, так и в различных неядерных областях промышленности и науки. Это открывает широкие возможности в создании измерительных систем с недостижимыми ранее параметрами в ядерной и нефтегазовой сферах, машиностроении, геодезии, строительстве, аэрокосмической индустрии, военной промышленности.

Так, в настоящий момент с участием авторского коллектива, основываясь на полученных в работе результатах, уже созданы и находятся в состоянии различной степени готовности и/или испытаний 3 новые измерительные волоконно-оптические системы для реакторной установки **БРЕСТ-ОД-300**.

Полученные результаты, разработанные технологии и изделия в рамках данной работы могут послужить основой для дальнейшего развития отечественной волоконной сенсорики, волоконной оптики, оптоэлектроники.

Объемы внедрения.

Система ИКС-49, обеспечивающая проведение измерений без выгрузки топлива на остановленном и расхоленном реакторе, была внедрена и использовалась с 2017 года **на всех 11 отечественных блоках АЭС РБМК-1000** и продолжает использоваться на остающихся в эксплуатации 7 энергоблоках. С 2019 года внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию высокотемпературная модификация ИКС-49, позволяющая проводить измерения непосредственно на работающем на мощности реакторе. Благодаря использованию различных модификаций ИКС-49 не только удалось ускорить и повысить безопасность и эффективность проведения восстановительных ремонтных работ энергоблоков, но и получить необходимые данные о состоянии параметров, влияющих на безопасную и надежную работу энергоблоков во всех режимах эксплуатации.

Достигнутый экономический и/или социальный эффект от внедрения.

Применение оптоволоконных систем измерения стрел прогиба тепловыделяющих сборок при выполнении внутриреакторного контроля в период 2019 – 2020 гг. показало весомый вклад в сокращение временных затрат на проведение внутриреакторного контроля – 13,6 суток ежегодно на один энергоблок с реактором РБМК-1000. Так с 2017 по 2023 год оптоволоконные системы измерения прогиба центральных труб тепловыделяющих сборок были использованы при проведении 45 этапов внутриреакторного контроля на реакторах РБМК. Таким образом, уже полученный экономический эффект от внедрения системы за счет оптимизации процессов выполнения ремонтов можно оценить порядка **24 млрд. руб.**

В период повторного дополнительного срока эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК-1000 (в период с 2024 по 2040 год) сокращение временных затрат на выполнение внутриреакторного контроля оценивается в 979 суток работы энергоблоков, в течение которых ожидаемая выработка электроэнергии может составить 18 801 млн кВт·ч, а дополнительная выручка – порядка **31 961 млн. руб.** (в ценах 2023 года без НДС).

Количественный эффект от перехода на режим работы энергоблока по «плавающим» заявкам с глубоким внедрением оптоволоконных систем измерения характеризуется двумя факторами: сокращением периода останова энергоблока за счет оптимизации процессов контроля и повышением эффективности выполнения ремонтных работ.

Организация режима эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК-1000 по «плавающим» заявкам в период повторного дополнительного срока эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК 1000 второго поколения (в период с 2024 по 2040 год) за счет снижения объемов ремонтных работ и повышения их эффективности высвобождает дополнительно порядка 1750 суток работы энергоблоков, в течение которых ожидаемая выработка электроэнергии может составить 33 600 млн. кВт·ч, а дополнительная выручка – порядка **57 120 млн. руб.** (в ценах 2023 года без НДС). Общее дополнительное время эксплуатации АЭС с РУ РБМК за период 2024 - 2040

гг., обусловленное всеми эффектами от глубокой интеграции оптоволоконных систем измерения прогиба центральной трубы тепловыделяющих сборок оценивается в размере до 2729 суток или 52 400 млн кВт·ч, что составляет порядка 10 % от ожидаемой генерации электроэнергии реакторами РБМК-1000 в период повторного продленного срока службы, расчетное значение дополнительной выручки за период с 2024 по 2040 год составит **89,1 млрд. руб.** (без НДС, в ценах 2023 года), в прогнозных ценах 2024-2040 гг. – **114,5 млрд. руб.**

Таким образом, общий экономический эффект за суммарный период 2017-2040 гг. достигнет 113,1 млрд. руб. в текущих ценах на электроэнергию и **138,5 млрд. руб.** в прогнозных ценах.