

УДК 681.51

## СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ РЕАКТОРОВ ВВЭР БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

А.Е. КАЛИНУШКИН, Ю.М. СЕМЧЕНКОВ

НИЦ «Курчатовский институт»  
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123098, Россия

Поступила в редакцию 30 января 2015

В основу обеспечения безопасности АЭС положен принцип глубоководной защиты, построенной на применении системы барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду. Констатируются следующие барьеры: топливная матрица, оболочка твэл, стенки оборудования контура циркуляции теплоносителя, защитное ограждение помещений реакторного отделения, санитарно-защитная зона вокруг объекта, зона реализации противоаварийных мероприятий. Для эффективного выполнения своих функций защитные барьеры должны быть устойчивы в различных состояниях и при различном развитии процессов, происходящих в ядерной установке и при разных внешних воздействиях [1].

На водо-водяном энергетическом реакторе (ВВЭР) [2] контроль сохранения эффективности первых трех барьеров осуществляется средствами контроля и диагностики реактора. Основной системой является комплексная система контроля, управления и диагностики РУ (СКУД) [3]. СКУД разработана НИЦ «Курчатовский институт» при участии ОКБ «Гидропресс», ВНИИАЭС, ГНЦ РФ-ФЭИ, Диапром, СНИИП-АСКУР, СНИИП.

Задачей СКУД является обеспечение ядерной и радиационной безопасности, надежности и эффективности реакторной установки (РУ) на этапе эксплуатации энергоблока, в том числе за счет:

- проверки правильности загрузки активной зоны;
- качества и требуемого быстродействия управления мощностью и распределением энерговыделения в активной зоне;
- мониторинга и подтверждения прогнозной (расчетной) оценки показателей выгорания ядерного топлива в тепловыделяющей трубке (ТВС) в процессе топливной кампании;
- мониторинга соблюдения проектных ограничений по эксплуатации ядерного топлива;
- тарировки средств внезонного нейтронного контроля;
- соблюдения эксплуатационных пределов и условий безопасности;
- реализации концепции «течь перед разрывом»;
- оценки фактической долговечности материалов, изделий и ресурса основного оборудования.

Интегрально СКУД состоит из самостоятельных систем, объединенных общей задачей контроля и диагностирования состояния реакторной установки с ВВЭР в процессе эксплуатации. СКУД построена по принципу объединения функционально законченных систем, выполняющих свои функции в полном объеме и соединяемых информационными потоками. В типовом варианте в состав СКУД входят системы [3]:

- внутриреакторного контроля (СВРК);
- комплексного анализа (СКА);
- контроля течей теплоносителя первого контура (СКТ), состоящей из двух независимых подсистем акустического (САКТ) и влажностного (СКТВ) контроля;
- контроля вибраций основного оборудования (СКВ);

– обнаружения свободных и слабо закрепленных предметов в главном циркуляционном контуре (СОСП);

– контроля остаточного ресурса основного оборудования (САКОР).

В состав также входят локальная сеть СВРК и локальная сеть СКУД.

Основной частью СКУД является система внутриреакторного контроля (СВРК).

СВРК является главным средством наблюдения за эксплуатацией топлива в активной зоне в режимах нормальной эксплуатации, нарушения нормальной эксплуатации реакторов ВВЭР и проектных авариях.

В процессе развития ВВЭР совершенствовался и внутриреакторный контроль, который прошел следующие этапы [4]:

– контроль с помощью внереакторных камер и термопар, расположенных на выходе из части ТВС;

– развитие за счет периодических активационных измерений;

– создание системы на базе постоянно размещенных в активной зоне родиевых ДПЗ и термопар на выходе из части ТВС.

В настоящее время НИЦ «Курчатовский институт» совместно с ОКБ «Гидропресс», СНИИП-АСКУР, СНИИП разработано новое поколение систем внутриреакторного контроля, именуемое СВРК-М, которое успешно эксплуатируется на ВВЭР-1000 и является составной частью проектов АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ.

Основу СВРК-М современных проектов ВВЭР большой мощности составляют:

– внутриреакторные датчики нейтронного потока (родиевые ДПЗ в количестве  $7 \times 54 = 378$  штук) и температуры ( $3 \times 54 = 162$  термоэлектрических хромель-алюмелевых преобразователей типа К);

– измерительная аппаратура высокого класса точности (погрешность 0,04 % для всех измерительных каналов);

– высокопроизводительная вычислительная техника в исполнении для ответственных применений;

– специализированное программное обеспечение.

Все оборудование и специализированное программное обеспечение СВРК-М разработано и изготовлено в России.

Следует выделить следующие основные отличительные особенности СВРК-М:

– устранение запаздывания родиевого ДПЗ для оперативного контроля энерговыделения в активной зоне;

– оперативный и независимый контроль тепловой мощности реактора по показаниям родиевых ДПЗ;

– контроль, аварийная и предупредительная защита по внутриреакторным (пиковым) факторам;

– независимый контроль мощности ТВС по показаниям родиевых ДПЗ и по данным внутриреакторного термоконтроля;

– внутриреакторная шумовая диагностика;

– отличие расчетной части программного обеспечения СВРК-М от используемого проектного кода.

Новые решения, а также структура построения СВРК-М позволили в условиях реальной эксплуатации ВВЭР реализовать новые функции: защиту по локальным параметрам активной зоны (линейное энерговыделение твэлов, запас до кризиса теплообмена) и внутриреакторную шумовую диагностику. Поскольку указанные локальные параметры являются расчетными и изменяющимися в процессе эксплуатации, данный тип защиты может реализовываться только с применением программного обеспечения («software»). Этой части разработки системы и верификации полученных решений было уделено особое внимание [5]. В частности на первом этапе были определены основные технические решения и проведено расчетное обоснование для определенного перечня проектных исходных событий (аварий) с учетом прогнозируемой проектной деградации свойств самой системы. Впоследствии были разработана аппаратура и необходимое программное обеспечение. Разработанная аппаратура получила условное название «Гиндукуш-М» и прошла процедуру квалификации по МЭК 60780 как аппаратура

систем защиты реактора (с учетом эффекта «старения»). Программное обеспечение для этой части системы было разработано в соответствии с рекомендациями МЭК 60880.

Учитывая, что по действующим правилам в процессе эксплуатации АЭС недопустимо специально создавать условия для проверки формирования сигналов защиты по локальным параметрам, на полигоне АСУТП (ЭНИЦ, г. Электрогорск) были проведены имитационные испытания качества работы функции защиты СВРК в условиях, близких к натурным условиям эксплуатации.

В дальнейшем функция защиты по внутриреакторным локальным параметрам прошла проверку в процессе эксплуатации на 3-м блоке Калининской АЭС, а также на 5-м и 6-м блоках АЭС «Козлодуй» (Болгария). Испытания осуществлялись по специально разработанным программам, которые затем нашли свое развитие в процессе пуска и освоения мощности обоих блоков АЭС «Тяньвань» (Китай) [6]. В настоящее время эти программы и методики введены в эксплуатационную документацию на СВРК-М. Следует отметить, что в составе СВРК-М также введена в штатную эксплуатацию функция внутриреакторной шумовой диагностики, суть которой состоит в контроле локальных изменений нейтронного потока и появления кипения в активной зоне ВВЭР. В качестве изменяющейся в момент наступления кипения характеристической функции индикатора технического состояния выбрано отношение дисперсии флюктуации («шума») нейтронного потока к току ДПЗ. Такое решение было апробировано и подтверждено натурными испытаниями.

Разработка СВРК-М проводилась в соответствии с российской и международной нормативными базами. Проект СВРК-М одобрен Ростехнадзором России. В настоящее время СВРК-М реализована на следующих энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000:

- 5 и 6 блоки АЭС «Козлодуй»;
- 1–2 блоки АЭС «Тяньвань»;
- 1–4 блоки Калининской АЭС;
- 1–4 блоки Балаковской АЭС;
- 2–3 блоки Ростовской АЭС;
- 1 блок АЭС «Куданкулам».

Ведется монтаж и наладка СВРК-М на 1 блоке Нововоронежской АЭС-2 (проект АЭС-2006) и наладка на 2 блоке АЭС «Куданкулам». Осуществлена поставка на 1 блок Ленинградской АЭС-2 (АЭС-2006). В настоящее время разработано и внедряется на АЭС новое поколение аппаратуры и вычислительных средств, расширяются функциональные возможности СВРК-М.

Другой составной частью СКУД являются системы оперативной диагностики. Их назначение – диагностирование технического состояния основного технологического оборудования первого контура в процессе эксплуатации реакторной установки в части контроля вибронагруженности и надежности крепления ее конструктивных элементов, обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов в контуре циркуляции теплоносителя и контроля его герметичности, а также оценки остаточного ресурса основного оборудования 1 контура.

Важной из систем диагностики является система обнаружения течи теплоносителя 1 контура [7, 8]. В ее составе используются две независимые информационно-измерительные системы. Принцип действия этих систем основанные на акустическом (САКТ) и влажностном (СКТВ) методах неразрушающего контроля. Основу акустического метода составляет регистрация и контроль уровня широкополосного шума, возникающего при истечении теплоносителя из-за негерметичности оборудования, влажностного-измерение относительной влажности воздуха в подизоляционном пространстве трубопровода. Поскольку относительная влажность сама по себе не характеризует содержание пара во влажном воздухе, то при измерении одновременно регистрируется температура влажного воздуха. На основании полученных показаний вычисляется абсолютная влажность, которая является наиболее информативным и надежным индикатором наличия течи. САКТ обнаруживает течь теплоносителя с расходом от 1,9 л/мин в течение времени не более 3 мин и определяет место течи и величину за время не более 10 мин. СКТВ имеет те же показатели, начиная с расхода 1 л/мин.

Работа реакторных установок с ВВЭР на любых режимах сопровождается вибрацией ее компонентов, в основном, вызванной наличием возбуждающих сил в первом контуре циркуляции теплоносителя. Благодаря тому, что спектр вибраций несет большой объем информации о текущих характеристиках оборудования, его контроль способен выявить уже на ранней стадии развития повреждений появление механических дефектов или аномальное изменение условий закрепления элементов конструкций. Вибрация компонентов, как правило, измеряется прямым (с помощью датчиков) или косвенным (регистрация физических характеристик, на изменение которых влияет вибрация) методом неразрушающих испытаний [9]. В системе контроля вибраций, входящей в состав СКУД, используются сигналы различных типов датчиков: датчики для измерения механических перемещений; внутриреакторные датчики нейтронного потока, внереакторные датчики нейтронного потока, датчики для измерения пульсации давления. Сравнительно медленное изменение параметров механических дефектов в материалах оборудования и трубопроводах, как правило, на практике позволяет отказаться от непрерывного контроля за вибрационным состоянием. Это определяет особые условия для функционирования системы и контроля за вибрационным состоянием. В частности, эти условия определяют возможность проводить процедуры контроля за вибрационным состоянием в режиме отсроченного анализа, например, не реже одного раза в неделю.

Одной из систем оперативной диагностики в составе СКУД является система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов. Наличие этой системы дает возможность в период пуска АЭС обнаружить посторонние предметы в главном циркуляционном контуре и, тем самым, предотвратить случаи повреждения основного оборудования. Эта же система позволяет обнаружить освободившиеся или частично потерявшие свое крепление предметы в процессе эксплуатации. Принцип действия основан на постоянном сравнении среднеквадратичных значений сигналов от датчиков с программно-устанавливаемым порогом. Для тестирования измерительных каналов в системе предусмотрено специальное устройство с молотками, которые наносят тестовые удары по оборудованию для имитации свободных (слабозакрепленных) предметов. Также в системе предусмотрены режимы экспресс-анализа и отсроченного интерактивного анализа.

В состав системы оперативной диагностики СКУД также входит система автоматизированного контроля остаточного ресурса. В настоящее время уточнение возможных безопасных сроков эксплуатации оборудования ограничено, и пока обеспечивается расчетом циклической прочности определенных рабочих зон для наперед заданных контрольных точек корпуса реактора, трубопроводов системы компенсации давления и самого компенсатора давления, главного циркуляционного контура [10]. Приоритетом при выборе зон контроля является выбор точек, для которых прогнозируемые значения повреждаемости за проектное время эксплуатации ВВЭР превышают установленные Главным конструктором. Исходными данными для расчета являются, в первую очередь, показания штатных температурных датчиков. Информационный инструментарий данной системы позволяет рассчитывать напряженно-деформируемое состояние с использованием приближенных формул для функциональных зависимостей этого состояния от параметров эксплуатации. Определяющие коэффициенты для формул вычисляются на базе проектных расчетов.

В настоящее время системами оперативной диагностики оснащены практически все реакторы ВВЭР большой мощности. Кроме того, в состав СКУД входит система комплексного анализа. В целом она позволяет персоналу на основе информации, имеющейся в СКУД и поступающей от систем АСУТП, проводить комплексный анализ текущего состояния активной зоны в целях раннего выявления скрытых отрицательных тенденций (аномалий) для безопасной эксплуатации реакторной установки и их превентивного устранения. С помощью информационных средств этой системы, в частности, программного комплекса ИР [11], можно прогнозировать (от текущего состояния) распределение поля энерговыделения в активной зоне реактора в переходных режимах, а также оценивать подкритичность и допустимую концентрацию борной кислоты на основе прогнозирования изменения параметров активной зоны. Эта система в том или ином виде реализована на всех блоках ВВЭР большой мощности, где и СВРК-М.

Таким образом, разработанная и применяемая на АЭС с ВВЭР большой мощности система контроля, управления и диагностики повышает безопасность и эффективность эксплуатации энергоблоков, способствует внедрению новых экономичных топливных циклов и продлению сроков службы АЭС.

#### Список литературы

1. Сидоренко В.А. // Атомкон. 2009. № 4 (5).
2. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М., 2002.
3. Калинушкин А.Е., Козлов В.В., Митин В.И., Семченков Ю.М. // Атомная энергия. 2009. т. 106, вып.1.
4. Митин В.И., Семченков Ю.М., Калинушкин А.Е. // Атомная энергия. 2009. Т. 106, вып. 5.
5. Калинушкин А.Е. // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2008 № 3 (27).
6. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. // Вопросы атомной науки и техники, серия «Обеспечение безопасности АЭС». 2008. Вып. 23.
7. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А. и др. Система акустического контроля (САКТ). Обнинск, 2006.
8. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А. и др. Система влажностного контроля течи водяного теплоносителя. Обнинск, 2006.
9. Аркадов Г.А., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. М., 2004.
10. Драченко В.Н., Беркович В.Я., Богачев А.В. и др. // Тяжелое машиностроение. 2008. № 3. С. 2.
11. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. // Атомная энергия. 2008. Т. 105, вып. 4.