



## ВОПРОСЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ВВЭР

(иллюстрации см. на цв. вклейке)

**Г. В. АРКАДОВ, Б. М. ФИНКЕЛЬ, В. И. ПАВЕЛКО, А. И. УСАНОВ,  
Н. Н. ДАВИДЕНКО, К. А. КОРНИЕНКО, Н. П. КОНОПЛЕВ**

Безопасность АЭС обеспечивается за счет реализации **принципа глубоко эшелонированной защиты**, который основан на применении системы барьеров на пути распространения радиоактивных веществ, а также на системе технических и организационных мероприятий по защите барьеров.

Одним из таких мероприятий является определение и прогнозирование технического состояния оборудования АЭС, реализуемое через системы оперативной диагностики реакторных установок.

Системы оперативной диагностики оборудования в случае их применения на всех этапах жизненного цикла АЭС позволяют:

- при разработке новых проектов РУ ВВЭР обосновывать принимаемые технические решения с использованием баз данных по фактическим условиям эксплуатации и отказам прототипных реакторных установок;
- на пускаемых энергоблоках фиксировать исходное техническое состояние оборудования, на которое следует ориентироваться при последующей промышленной эксплуатации;
- в ходе каждого эксплуатационного цикла контролировать целостность первого контура, неизменность условий закрепления оборудования, отсутствие деградации или сбойных параметров АСУ ТТ;
- оптимизировать объем контроля металла при ревизиях оборудования, оптимизируя тем самым и продолжительность планово-предупредительных ремонтов;
- оценить эффективность проводимых модернизаций и замен элементов оборудования.

Исходными проектами реакторных установок ВВЭР применение систем оперативной диагностики не предусматривалось. Предполагалось, что ресурс безопасной эксплуатации оборудования будет обеспечен за счет последовательной реализации следующих мероприятий:

- обоснование прочности и долговечности оборудования на этапе его проектирования для назначенного срока службы консервативным путем, т. е. с использованием наилучших и наиболее жестких комбинаций нагружающих параметров;
- пусконаладочные испытания и измерения оборудования каждой реакторной установки, вводимой в эксплуатацию, с подтверждением принятых проектных решений и назначенного срока службы;
- неразрушающий контроль металла, осмотры и обмеры оборудования при ежегодных ревизиях.

Принятый подход был оправдан тем, что обоснование прочности и долговечности оборудования РУ ВВЭР на этапе его проектирования имело целью обеспечение назначенного срока службы, при достижении которого предполагалось прекращение эксплуатации энергоблока независимо от технического состояния оборудования. Соответственно, в проект закладывались минимальные объемы эксплуатационного контроля целостности оборудования и темпов выработки ресурса.

Немаловажным является также то обстоятельство, что во времена проектирования действующих РУ ВВЭР отсутствовали отработанные средства и методики диагностирования.

Недостаточность такого объема мероприятий проявилась уже в первое десятилетие эксплуатации РУ ВВЭР в связи с повреждениями оборудования, которые развивались за один межремонтный период.

В последнее десятилетие с учетом старения оборудования стала очевидной необходимость полномасштабного применения систем оперативной диагностики как средства, обеспечивающего определение и прогнозирование технического состояния оборудования. В этой задаче системы диагностики выступают своеобразным компенсирующим мероприятием, учитывающим фактическое старение оборудования.

Новым и весьма серьезным фактором является действующая в России программа управления сроком службы реакторных установок, которая предусматривает в том числе и продление срока службы установок ВВЭР первого поколения. В этих задачах системам оперативной диагностики уделяется большое значение как одному из немногих объективных инструментов, которые определяют как саму возможность, так и условия продления срока службы конкретного энергоблока.



Для реализации указанных выше задач в состав оперативной диагностики введены (**см. цветную вклейку**):

**система контроля течей теплоносителя**, которая должна выявлять:

- протечки по разъемным соединениям;
- протечки через дефекты в оборудовании и трубопроводах;
- межсистемные протечки из I во II контур, а также через неплотности арматуры;

**система виброшумовой диагностики**, предназначенная для выявления аномальных вибрационных состояний, вызванных изменением условий закрепления оборудования, изменением его жесткостных характеристик или возрастанием гидродинамических нагрузок со стороны потока теплоносителя;

**система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов**, которая должна фиксировать факт появления посторонних предметов в контуре циркуляции, а также возникновение ударов из-за ослабления крепления оборудования;

**система определения остаточного циклического ресурса**, предназначенная для оценки повреждаемости узлов и единиц оборудования с наибольшей термической нагруженностью; система режимной диагностики, позволяющая по специализированному анализу технологических параметров выявлять непроектные состояния оборудования и систем РУ (течи теплоносителя, сбойные параметры АСУ ТП, непроектные переходные режимы и состояния оборудования, отрицательно сказывающиеся на его сроке службы);

**система виброконтроля роторного оборудования**, являющаяся весьма эффективным средством обслуживания по реальному техническому состоянию многочисленного парка вращающихся механизмов АЭС (главные циркуляционные насосы, насосы подпитки первого контура, агрегаты в системах вентиляции и т. д.).

В последние годы начались также работы по диагностированию трубопроводной арматуры АЭС в контексте задачи перехода на обслуживание и ремонт по реальному состоянию.

Нынешнее состояние разработки и внедрения систем диагностики можно охарактеризовать следующими положениями.

I. К настоящему времени значительная часть российских энергоблоков с ВВЭР оснащена системами или элементами систем из числа описанных выше. В результате повышается культура эксплуатации, накапливается опыт эксплуатационного контроля состояний оборудования, а в ряде случаев использование систем позволило своевременно выявить аномальные состояния в контролируемом оборудовании.

Кроме того, самостоятельный интерес представляют базы данных по фактическим условиям эксплуатации оборудования, накапливаемые системой диагностики.

Такие базы данных, с одной стороны, позволяют сравнивать и систематизировать условия работы однотипного оборудования, эксплуатируемого на различных энергоблоках. На основе статистического анализа полученных данных в проектную и эксплуатационную документацию могут быть введены критерии приемлемости результатов контроля. С другой стороны, базы данных по фактическим условиям эксплуатации оборудования могут использоваться при проведении работ по его модернизации. Это соответствует духу и букве нормативных документов надзорных органов РФ, согласно которым технические решения, принимаемые при реконструкции или модернизации элементов АЭС, должны быть апробированы прежним опытом, включая опыт эксплуатации прототипа, а также испытаниями и исследованиями.

II. Создан отраслевой Центр диагностики при концерне «Росэнергоатом», который за счет объединения специалистов отрасли различного профиля в состоянии решать комплексные вопросы разработки, внедрения и сопровождения эксплуатации систем диагностики на действующих энергоблоках совместно со специалистами созданных на АЭС лабораторий технической диагностики.

III. Выполнен значительный объем работ по математическому обеспечению систем диагностики в виде методик и алгоритмов диагностирования, включая разработку шумовых, вибрационных, логических диагностических моделей.

Особая важность этого направления работ обусловлена тем, что системы оперативной диагностики (в отличие от традиционных систем контроля целостности, ориентированных на прямые измерения с установлением наличия или отсутствия дефекта) оценивают техническое состояние объекта косвенным образом по параметрам отклика оборудования:

- изменению частот и форм колебаний оборудования при изменении условий его закрепления;
- технологическим шумам, возникающим при работе оборудования и меняющимся в зависимости от его состояния;
- виброакустическим шумам или импульсам при появлении аномалии и т. д.

Очевидно, что для постановки диагноза должна быть установлена взаимосвязь между параметрами состояния оборудования и информативными диагностическими признаками, в наибольшей степени характеризующими каждое из возможных состояний.



В этой связи следует отметить результаты работ по математическому обеспечению системы виброшумовой диагностики [1], которая является наиболее наукоемкой из числа систем диагностики.

Применительно к этой системе разработка математического обеспечения велась в следующих направлениях:

- создание «шумовых» моделей для контроля теплогидравлических и нейтронно-физических параметров (поканальных расходов теплоносителя, недогретого кипения теплоносителя, температурных и барометрических коэффициентов реактивности);
- адаптация к условиям ВВЭР методов взаимного спектрального анализа стохастических сигналов;
- адаптация к условиям ВВЭР методики многомерного авторегрессионного анализа для возможности детального исследования источников колебаний того или иного элемента оборудования;
- расчетное моделирование вибрационных характеристик оборудования и топливных сборок, реализованное в виде набора программ на базе кода ANSYS;
- библиотека сценариев, содержащая диагностические признаки и уставки для наиболее вероятных аномальных вибросостояний.

Первые четыре программных продукта предназначены в основном для персонала диагностического Центра, имеющего навыки в обработке и анализе вибрационных сигналов. Библиотека сценариев разработана для персонала АЭС.

Данные программные продукты совместно с эксплуатационными базами данных позволяют конкретизировать понятия «норма—аномалия» для использования в эксплуатационной документации по применению систем виброшумовой диагностики.

**IV.** Специализированными российскими организациями (**ВНИИАЭС, Диапром, ФЭИ, ВНИ-ИЭФ, СНИИП** и др.) разработана, аттестована и обеспечена техническими условиями большая часть измерительных каналов в системах шумовой диагностики.

Переходя к вопросам практического применения систем, отметим, что на сегодняшний день имеется практическая отдача от большинства смонтированных систем в рамках таких работ, как:

- реализация концепции «течь перед разрушением» на российских установках ВВЭР-440;
- раннее выявление течей теплоносителя на ряде АЭС;
- обоснование возможности продления назначенного срока эксплуатации внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР первого поколения;
- анализ вибронегруженности топливныхборок реакторов ВВЭР в связи с проводимой модернизацией их конструкций.

В указанных задачах системы оперативной диагностики выступили как инструмент, расширяющий наблюдаемость объекта контроля. В ряде случаев были реализованы традиционные этапы диагностирования:

- конкретизация понятия «проектное состояние» по результатам анализа проектной документации и анализа баз данных по фактическим параметрам эксплуатационного нагружения и отклика оборудования;
- регистрация аномального состояния;
- рекомендации по ремонту или модернизации оборудования;
- проверка эффективности выполненной модернизации.

**В качестве примера реализации всех указанных выше мероприятий можно привести комплекс работ по снижению вибронегруженности внутрикорпусных устройств и рабочих кассет реактора №2 Кольской АЭС [2].**

1. Аркадов Г. В., Павелко В. И., Усанов А. И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. — М.: Энергоатомиздат, 2004.

2. Овчаров О. В. и др. Опыт виброшумового контроля внутрикорпусных устройств и рабочих кассет реакторов ВВЭР-440 различных проектов // 4-я Международная конференция «Безопасность АЭС с ВВЭР», Подольск. — 2005.



По вопросам сотрудничества просьба обращаться:  
Центр диагностики «Диапром», 109507, РФ, Москва, ул. Ферганская, 25  
Тел./факс: (495) 376 14 36  
E-mail: [diaprom@diaprom.com](mailto:diaprom@diaprom.com)