

Использование системы автоматизированного контроля остаточного ресурса для решения эксплуатационных задач АЭС с ВВЭР

В. Я. Беркович, А. В. Богачев, Б. Н. Дранченко, В. П. Семишкин

ОАО ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

Обобщен опыт внедрения программного обеспечения системы автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР-М) в составе системы диагностики остаточного ресурса. Внедряемый на 2-м энергоблоке Ростовской АЭС САКОР-320 дополнительно включает поверхностные термометры сопротивления, решает обратную задачу, учитывает реальное перемещение парогенераторов, проводит расчет усталостного подрастания дефектов, а также оценивает предельные состояния по критериям течи перед разрушением.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, система автоматизированного контроля, усталостное повреждение, диагностика, остаточный ресурс.

1. Общая схема использования системы автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР-М) на АЭС. При решении задач управления ресурсными характеристиками в процессе эксплуатации необходимо учитывать реальное нагружение оборудования и наличие начальной дефектности, максимально используя при этом имеющийся объем информации в проектных теплогидравлических и прочностных расчетах. Эту задачу предлагается решить при создании и внедрении на АЭС системы САКОР-320 для реакторной установки (РУ) ВВЭР, в основе которой лежит расчетная оценка усталостного повреждения по фактическому, т.е. зарегистрированному в процессе эксплуатации, нагружению.

Решение задачи выбора контрольных точек, определение нагружающих параметров и их расчет по штатным датчикам, а также расчет коэффициентов в функциональных зависимостях напряжений являются индивидуальными для каждого проекта РУ. В САКОР-М (1-й энергоблок Ростовской АЭС, 3-й энергоблок Калининской АЭС, 2-й энергоблок Хмельницкой АЭС и 4-й энергоблок Ровенской АЭС), САКОР-428 (1- и 2-й энергоблоки АЭС “Тяньвань”, Китай), и САКОР-446 (АЭС “Бушер”, Иран), которая относится к системам первого поколения, использовались упрощенные консервативные подходы.

2. Внедрение программного обеспечения “САКОР-М” в составе системы диагностики остаточного ресурса. Структура системы диагностики остаточного ресурса (СДОР) состоит из сервера, автоматизированного рабочего места (АРМ) инженера-диагноста, системного программного обеспечения (ПО) и прикладного ПО “СДОР”, размещаемого на сервере, прикладного ПО “САКОР-М”, размещаемого на АРМ инженера-диагноста.

В качестве прикладного ПО АРМ инженера-диагноста используется прикладное ПО “САКОР-М”, разработанное для РУ типа В-320 в ОКБ “Гидропресс”. Для его работы сервер СДОР должен получать текущие значения технологических параметров от штатных датчиков, предусмотренных проектом автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) блока № 2 Хмельницкой АЭС. Для этой цели используется штатное

оборудование информационно-вычислительной системы (ИВС) и комплексной системы диагностики (КСД) энергоблока.

Информация в режиме on-line поступает от штатных датчиков в сервера ИВС и через них на сервер КСД. Сбор информации по параметрам эксплуатации РУ заключается в организации связи и передачи информации со штатных датчиков на сервер СДОР и далее на АРМ СДОР. Организация сбора информации по показаниям штатных датчиков и передача ее на сервер СДОР представлены на рис. 1.

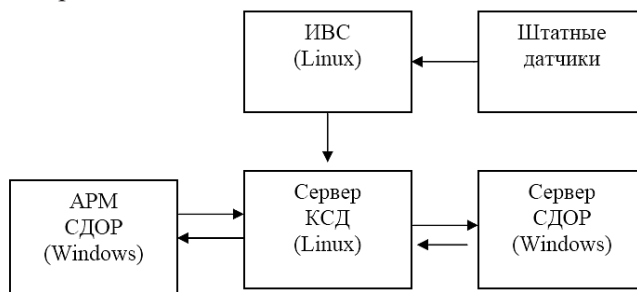


Рис. 1. Схема функциональной структуры СДОР.

Информация со штатных датчиков контроля термомеханического состояния поступает в ИВС, в базе данных которой фиксируются показания штатных датчиков с интервалом, составляющим 2 с. На этом же этапе проводится оцифровка сигналов и создание общей базы данных. На сервер КСД поступают значения показаний датчиков с ИВС, в том числе и показания штатных датчиков, задействованных прикладным ПО “САКОР-М”. Сервер КСД, работающий под операционной системой Linux, связан локальной сетью с сервером СДОР, который работает под операционной системой Windows. В этой сети производится непрерывная передача среза информации по показаниям штатных датчиков, задействованных прикладным ПО “САКОР-М”, с интервалом, составляющим 2 с. Данную процедуру выполняет программа, размещенная на сервере КСД. В результате на сервере СДОР создается файловая структура типа 1 показаний штатных датчиков, задействованных прикладным ПО “САКОР-М”. Для выборки из общей базы данных КСД показаний штатных датчиков используется настроечный файл с перечнем датчиков, задействованных прикладным ПО “САКОР-М”.

Файловая структура типа 1 создается на жестком диске сервера СДОР в зарезервированной директории в виде набора текстовых файлов. Информация за каждые сутки заносится в отдельный файл, которому присваивается имя, соответствующее дате этих суток. Прикладное ПО “САКОР-М”, выполняющее расчет накопленного усталостного повреждения, размещается на АРМ СДОР. Данное АРМ оснащено промышленным компьютером, на котором установлена операционная система Windows. Файлы файловой структуры типа 1 с сервера СДОР переносятся в специализированную директорию на сервере АРМ СДОР автоматически при запуске прикладного ПО “САКОР-М”. Инженер-диагност на АРМ СДОР проводит обработку файловой структуры типа 1 с помощью прикладного ПО “САКОР-М”, устанавливаемого на АРМ СДОР, и перевод ее в файловую структуру типа 2.

3. Применение результатов САКОР-М. Результаты работы САКОР-М могут быть использованы в различных эксплуатационных ситуациях. Ниже приведены некоторые из них, когда знание остаточного ресурса по реальному нагружению позволяет управлять старением металла оборудования и оперативно принимать решения о ремонтных мероприятиях или о возможности дальнейшей эксплуатации АЭС.

Превышение числа проектных режимов. В технологическом регламенте АЭС задано ограничение на количество проектных режимов, которое устанавливается на основании поверочных расчетов на усталостную прочность. При его превышении необходимо выполнять работу по обоснованию остаточного ресурса оборудования РУ. Аналогичная ситуация возникает в случае протекания единичного по проекту или непроектного режима. При решении вышеперечисленных вопросов предполагается использование результатов работы САКОР-М, которые показывают, что можно не проводить инструментированный контроль металла оборудования. Подробно использование САКОР-М в подобной эксплуатационной ситуации в режиме, который связан с неподачей быстродействующей редуцирующей установки сброса пара в атмосферу, приведено в [1].

Выявление термопульсаций. В случае если возникают стратификация и термопульсации в трубопроводах подачи теплоносителя малым расходом, использование САКОР-М позволяет не только на ранней стадии выявить режимы, вносящие заметный вклад в усталостное повреждение, но и количественно оценить последствия реализации этих режимов в виде накопленного повреждения. При малом открытии регулятора на трубопроводе впрыска осуществляется впрыск в компенсатор давления (КД), что приводит к возникновению термопульсаций. На рис. 2 представлены параметры в таком режиме: температуры в КД (верхняя линия), в дыхательном трубопроводе у главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) (пульсирующая 1), в трубопроводе впрыска (пульсирующая 2) и в горячей нитке ГЦТ четвертой петли.

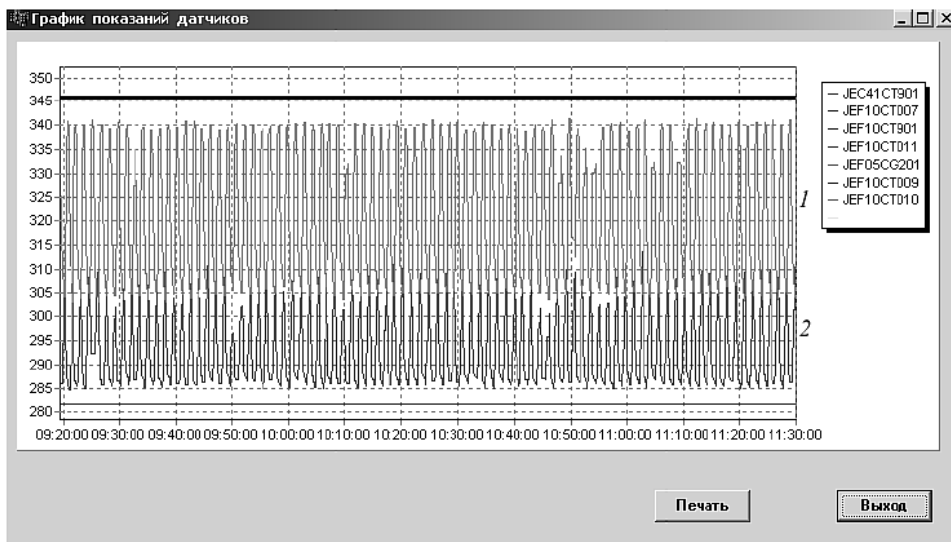


Рис. 2. Пульсации температуры в патрубке КД и соединительном трубопроводе в процессе пусконаладочных работ.

При переходе на режимы суточного маневрирования мощностью реактора САКОР-М может использоваться для автоматического учета накопленного усталостного повреждения в режимах изменения мощности.

4. Способы восстановления истории нагружения энергоблока за эксплуатационный период, предшествующий внедрению САКОР-М. В случае если на АЭС имеется архивированная база данных по показаниям штатных датчиков, собранная АСУТП энергоблока в процессе предыдущей эксплуатации, представляется возможным автоматизировать процесс восстановления входной информации для САКОР-М. Разработано ПО, которое позволяет проводить выборку из архивной базы данных ИВС показаний штатных датчиков, задействованных прикладным ПО “САКОР-М”. Для выполнения данной функции используется штатная функция ИВС выборки из архива показаний датчиков по списку за заданный промежуток времени. Показания датчиков в течение дня, за который восстанавливается информация, выбираются из архива и в виде трех файлов на магнитных носителях переносятся на АРМ СДОР. Данная процедура выполняется службой системных программистов АЭС, отвечающих за эксплуатацию ИВС и КСД.

В основу методики оценки накопленного усталостного повреждения с использованием САКОР-М при отсутствии архивов ИВС с показаниями штатных датчиков положены имеющиеся данные по режимам нагружения, принятые при обосновании проекта РУ. В качестве примера рассмотрим восстановление информации по оперативному журналу с использованием САКОР-М по 1-му энергоблоку Ростовской АЭС за два года эксплуатации и сравним полученные результаты с данными расчетов посредством САКОР-М за время с 10. 11. 2001 г. по 01. 01. 2004 г. Для каждого дня за этот срок по записям в эксплуатационном журнале были выбраны реализованные на энергоблоке проектные режимы эксплуатации (табл. 1). На рис. 3 показано изменение параметров эксплуатации, зафиксированное САКОР-М в процессе разогрева в июне 2002 г.

Т а б л и ц а 1

Проектные режимы в процессе разогрева

Дата	Время	Описание проектного режима
13.06.02	14:05	Уплотнение (с последующим заполнением) главного разъема реактора
15.06.02	06:55	Заполнение парогенераторов (ПГ) 1–4
20.06.02	04:30	Гидроиспытания 1-го контура на плотность
20.06.02	05:50	Гидроиспытания 2-го контура на прочность
22.06.02	18:41	Опробование предохранительного клапана (ПК) КД со срабатыванием клапанов на линии сбора пара (идентификационные проектные коды УР21SO1, УР22SO1, УР23SO1) от ключа управления (КУ) блочного щита управления (БЩУ)
23.06.02	19:55	Опробование импульсно-предохранительного устройства (ИПУ) ПГ реальным повышением давления
25.06.02	06:40	Разогрев РУ до “горячего” состояния

Выборка из протокола расчета САКОР-М по накоплению повреждения на конец декабря 2003 г. в контрольных точках энергоблока представлена в табл. 2. Там же приведены проектные коэффициенты повреждения за полный проектный срок эксплуатации. Кроме того, для ряда контрольных точек оценено повреждение при реальной последовательности режимов, при этом данные по режимам взяты из проекта. Как видно, проектная оценка циклического повреждения более консервативна, что является естественным с учетом консервативности протекания рассматриваемых в проектных расчетах режимов.

Т а б л и ц а 2

**Выборка из протокола по накоплению повреждения
в контрольных точках оборудования на 01.01.2004 года**

№ контрольной точки энергоблока	Контрольная точка оборудования	Усталостное повреждение по САКОР на 01.01.04	По проекту	
			На 01.01.04	За проектный срок
УС00 1	Горячий патрубок Ду850 ГЦТ1	0,000479	0,000927	0,185
УА11 1	Сварное соединение горячей нитки с реактором ГЦТ1	0,006853	0,009805	0,957
УА41 13	Врезка соединительного трубопровода в горячую нитку ГЦТ 4	0,005440	0,011040	0,510
УВ10 2	Патрубок питательной воды	0,001139	0,002890	0,590

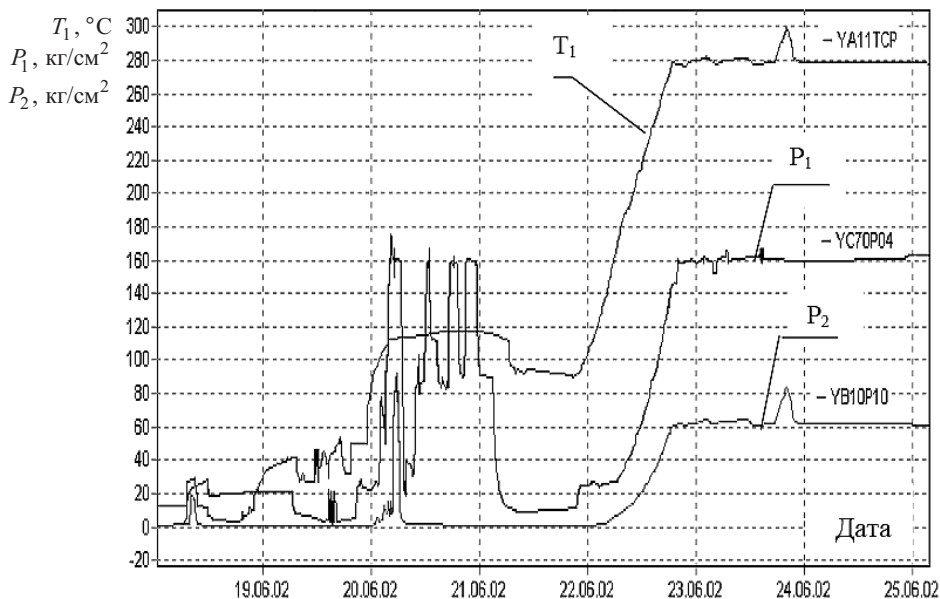


Рис. 3. Изменения параметров эксплуатации в процессе разогрева в июне 2002 г.: P_1, T_1 – соответственно давление и температура в 1-м контуре; P_2 – давление во 2-м контуре.

5. Модернизация САКОР-М на примере САКОР-320.

5.1. *Расширение перечня контрольных точек для управления старением оборудования.* Для зон смешения теплоносителей с различной температурой и граничащих с ними узлов затруднительным является учет режимов, которые возникают в случае подачи теплоносителя с малым перепадом давления или с периодической подачей теплоносителя. При этом температура вверху и внизу трубопровода может различаться вследствие температурного расслоения теплоносителя в сечении трубы, т.е. явления стратификации. Эти узлы должны подлежать контролю остаточного ресурса с установкой датчиков термоконтроля в непосредственной близости от узла.

В ряде случаев в объеме сварного соединения возможно наличие начальной дефектности в виде пор, непроваров, подрезов, шлаковых включений и т.д. При этом в качестве компенсирующего мероприятия можно применить метод расчетной оценки подрастания начальной дефектности, что позволит гарантировать безопасную эксплуатацию оборудования и уменьшить периодичность неразрушающего контроля данных сварных соединений.

В процессе эксплуатации АЭС возникают повреждения оборудования, которые обусловлены малоизученными механизмами разрушения в условиях коррозионного воздействия теплоносителя. К ним можно отнести повреждения в зоне кармана коллектора и в теплообменных трубках ПГ. Здесь напряжение контролируется в процессе эксплуатации.

5.2. *Расчет нагружающих факторов по показаниям штатных датчиков.* Одним из важных моментов определения остаточного ресурса оборудования является установление всех нагружающих факторов, действующих на его узлы. К ним относятся: давление в различных контурах РУ; температурная компенсация трубопроводов в условиях стеснения; температурный момент на трубопроводах, вызванный стратификацией; перемещение оборудования вследствие действия сил трения, локальных изменений температуры в различных зонах контура РУ. По показаниям штатных датчиков необходимо рассчитать нагружающие факторы, действующие на каждый узел. Разработана методика, позволяющая рассчитывать непроектные перемещения оборудования, интегральную температуру по сечению трубопроводов для их учета в температурной компенсации, температурный момент от стратификации теплоносителя и поле температур в зоне узла.

Если температуры вверху и внизу трубопровода различаются, возникает дополнительно явление стратификации. В этом случае выполняют расчет интегральной температуры и температурного момента по показаниям датчиков по сечению трубопровода.

В случае измерения температуры на наружной поверхности трубопровода используется обратная задача теплопроводности: расчет закона изменения температуры на внутренней поверхности по результатам измерений температуры на наружной поверхности. Рассматриваемая в САКОР-320 геометрия объектов ограничивается конструкциями типа труб, а температура является функцией времени и одной пространственной координаты, направленной вдоль нормали к поверхности.

На корпусе ПГ установлены амортизаторы, на каждом из которых имеется по датчику перемещения, измеряющих перемещение в направлении оси

амортизатора. Зная показания датчиков перемещения на амортизаторах ПГ, можно найти перемещение любой точки корпуса ПГ на опорах, в том числе вследствие термического расширения ГЦТ. Это позволяет учитывать реальное перемещение основного оборудования при расчете напряженного состояния.

5.3. Расчет предельных состояний в процессе эксплуатации. Расчет усталостного роста дефектов и оценка предельных состояний по хрупкой и вязкой прочности выполняются для схематизированных экспертным путем дефектов на основе результатов автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК). При расчете подрастания дефектов с использованием циклической процедуры по последовательности условно-упругих напряжений и вычисленным по ним коэффициентам интенсивности напряжений несплошность заменяется эллиптической трещиной. Затем по полученному размеру дефектов по критериям вязкой и хрупкой прочности оцениваются предельные состояния.

Для зоны радиусного перехода в кармане коллектора рассчитываются напряжения по кольцу и фиксируются случаи превышения ими предела текучести. Для контроля напряженного состояния теплообменных трубок ПГ используется зависимость максимального местного напряжения для дефекта в виде полости, моделируемой эллипсоидной язвой. Определяя напряженное состояние теплообменных трубок по величине полости для детерминированных значений размеров дефектов, рассчитываются время превышения напряжениями предела текучести в условиях коррозионной среды и возможность зарождения трещины по механизму растрескивания под напряжением. Дополнительно для кармана коллектора и трубного пучка оценивается накопленное усталостное повреждение с учетом влияния среды 2-го контура и скорости деформирования.

6. Расширенные возможности САКОР-320. В случае наличия незначительных дефектов в сварных соединениях трубопроводов и оборудования результаты САКОР-М могут быть использованы для обоснования безопасной эксплуатации РУ. Данную задачу выполняет модуль САКОР-М, предназначенный для расчета усталостного подрастания начальных дефектов и оценки предельных состояний по критериям вязкой и хрупкой прочности. При проведении предэксплуатационного неразрушающего контроля (НК) методами АУЗК обнаружены начальные дефекты в сварных соединениях ГЦТ [2]. Их ремонт является технологически сложным и дорогостоящим. В качестве компенсирующего мероприятия применяется метод расчетной оценки подрастания начальной дефектности, что позволяет оптимизировать периодический наружный контроль в сварных соединениях.

В зонах с возникновением повреждений согласно опыту эксплуатации САКОР-М может использоваться для контроля напряженного состояния в процессе эксплуатации независимо от реализующегося механизма повреждения. Знание напряженного состояния при эксплуатации позволяет правильно оценить вклад каждого из факторов в реализацию повреждения и создать условия эксплуатации, минимизирующие повреждение. В качестве примера можно привести использование САКОР-М для диагностики напряженного состояния зоны соединения патрубка ПГ с горячим коллектором 1-го контура.

Разработана методика учета возможных нагружающих факторов и проведен расчет коэффициентов в формулах зависимости напряжений от нагружающих факторов.

При увеличении межремонтных периодов необходимо использовать компенсирующие мероприятия. Наиболее актуальным является применение результатов работы САКОР-М для оптимизации программы наружного контроля (НК) оборудования РУ. Это даст возможность проводить контроль в тех зонах, где реализовалось наибольшее нагружение оборудования как за весь срок службы, так и за промежуток времени от последнего НК в данной зоне. Оптимизация объемов, методов и периодичности НК позволит уменьшить объемы контроля в ненагруженных зонах, в результате чего сократится время проведения планового производственного ремонта на АЭС. С другой стороны, зоны, подвергающиеся интенсивному воздействию теплоносителя, будут более тщательно проверены.

При продлении ресурса в результате эксплуатации САКОР-320 в течение проектного срока службы энергоблока будет создана база данных по показаниям датчиков термосилового контроля, изменению нагружающих факторов и напряженного состояния в контрольных точках и по накоплению повреждения по различным механизмам разрушения. Все эти данные являются основными при анализе состояния оборудования и трубопроводов РУ при обосновании возможности их эксплуатации сверх проектного срока службы.

Резюме

Узагальнено досвід впровадження програмного забезпечення системи автоматизованого контролю залишкового ресурсу в складі системи діагностики залишкового ресурсу. Впроваджений на 2-му енергоблоці Ростовської АЕС САКОР-320 додатково включає поверхневі термометри опору. За його допомогою розв'язується обернена задача, враховується реальне переміщення парогенераторів, проводиться розрахунок утомного підростання дефектів, а також оцінюється граничний стан за критеріями течі перед руйнуванням.

1. *Bogachev A. V., Bakirov M. B., Dranchenko B. N., and Semishkin V. P.* Operating experience of system of the automated control of a residual cyclic resource for RP with VVER-1000 // Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT18). – Beijing, China, August 7–12, 2005.
2. *Богачев А. В., Дранченко Б. Н., Семишкин В. П., Беркович В. Я.* Развитие системы САКОР-М // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 15. Реакторные установки ВВЭР.* – 2006. – С. 100 – 116.

Поступила 21. 06. 2009