

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СОВМЕСТНО С СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ ГИДРОАМОРТИЗАТОРОВ НА ЭТАПЕ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ЭНЕРГОБЛОКА

**В.Я. Беркович, А.В. Богачев, Д.Б. Муравин, А.В. Меркун,
А.О. Нагорный, Е.В. Шагов, В.П.Семишкин**
(ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)

В.Н. Барков
(ФГУП ЭЗАН)

А.В. Жуков
(ООО «СНИИП-АСКУР»)

Введение

Продление срока службы энергоблока связано с выполнением целого комплекса мероприятий для подготовки его к дальнейшей эксплуатации. Требования, по которым составляется программа модернизации энергоблока, зафиксированы в нормативных документах НП-017-2000 «Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции» и СТО 1.1.1.01.006.0327-2008 «Стандарт организации. Продление срока эксплуатации блока атомной станции». Среди них есть требование о необходимости разработки Программы по управлению ресурсными характеристиками, содержание которой регламентировано стандартом концерна «Росэнергоатом» «Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций». СТО 1.1.1.01.007.0281-2010. В настоящий момент разработаны и введены в действие федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения" (НП-096-15)

Для того, что бы «управлять ресурсом», заранее предвидя возможность ремонта/ замены/ модернизации элемента, необходимо иметь прогноз остаточного ресурса, который можно получить, применяя методы непрерывной аналитической диагностики состояния металла, которые совместно с периодическим применением НК позволят управлять ресурсными характеристиками. Неразрушающий контроль (НК) является прямым физическим методом выявления повреждения металла оборудования и имеет ряд особенностей. НК выявляет уже последствие повреждения металла в виде различного типа дефектов и не может дать количественную оценку приближения состояния к образованию дефекта. Кроме того НК можно проводить только во время ППР, а зоны концентрации напряжений для РУ типа ВВЭР расположены на внутренних поверхностях оборудования и трубопроводов, к которым доступ персонала ограничен и соответственно имеется большое количество непригодных для контроля мест. В качестве метода непрерывной аналитической диагностики состояния металла предлагается использовать систему автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР-320).

Энергоблоки, находящиеся в эксплуатации и подлежащие продлению ресурса, имеют следующие проблемы препятствующие управлению ресурсными характеристиками:

- металл оборудования РУ частично выработал свой ресурс и необходимо количественно оценить величину накопленного повреждения;
- имеются начальные несовершенства (язвы, коррозия, случай повреждения с последующим ремонтом и т. д.);
- на энергоблоке имеется недостаточный объем современного контроля параметров эксплуатации для полного расчета всех нагружающих факторов (нагрузок на оборудование);
- необходимость контролировать напряженное состояние и остаточный ресурс зон повреждения во время эксплуатации (например, зону с.с. №111).

Внедрение системы автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР-320) совместно с системой контроля гидроамортизаторов (ГА) и дополнительных термометров

сопротивления (ТСП) позволяет устранить эти препятствия и реализовать полный расчет всех нагружающих факторов.

В процессе эксплуатации энергоблока на оборудование РУ могут воздействовать нагрузки, не предусмотренные в проекте. К этим нагрузкам в первую очередь следует отнести непроектное перемещение оборудования РУ, термопульсации и стратификация теплоносителя во всех эксплуатационных режимах. Поэтому, в рамках управления ресурсом необходимо на ранней стадии выявить повышенные нагрузки на оборудования, предварительно разработав критерии повышенной нагрузки, принять меры по устранению данного воздействия с оценкой величины вклада данного воздействия в повреждение оборудования и трубопроводов.

Все эти функции выполняет различное программное обеспечение (ПО), входящее в состав САКОР-320, состав которого будет описан ниже.

1 Приведение объема термосилового контроля к требованиям САКОР

Для получения достоверных результатов по эксплуатационным нагрузкам необходимо выявить все возможные нагружающие факторы и разработать методы их определения по показанию датчиков. Должны рассчитываться нагрузки от давлений первого и второго контуров, температурная компенсация трубопроводов в условиях реального перемещения оборудования и стратификации теплоносителя, термопульсации теплоносителя во всех эксплуатационных режимах.

Недостаточный объем современного контроля параметров эксплуатации можно устранить установкой дополнительных датчиков (в том числе датчиков линейного перемещения на ГА) или использованием имеющихся систем (ИВС, СВРК). Использование датчиков от уже имеющихся на энергоблоке систем позволяет удешевить внедрение САКОР, уменьшив дозозатраты персонала АЭС при монтаже системы и дальнейшему ее обслуживанию в процессе эксплуатации.

На ГЦТ вопрос контроля стратификации теплоносителя в аварийных режимах при подаче холодного борного раствора и отключенных ГЦНА решен с использованием имеющихся штатных термопар и термометров сопротивления погружного типа, сигналы с которых передается от ИВС и СВРК.

На поверхности ПГ установлены по восемь ГА в два ряда по высоте, на каждом из которых имеется по одному датчику линейного перемещения (ДЛП), измеряющих перемещение в направлении оси ГА. На рисунке 1 приведена схема расстановки ГА на ПГ. Это создает избыточность показаний датчиков линейного перемещения для расчета перемещений корпусов ПГ1-4, для которого нужно 4 датчика, что значительно повышает надежность функции расчета перемещений. Узел крепления датчика на ГА выполнен в варианте защищающим шток датчика от воздействия человека и выдерживающий весовую нагрузку более 100 кг. В качестве ДЛП выбран индуктивный датчик, который по сравнению с применяемыми потенциометрическими штатными датчиками на РУ В-320 вновь пускаемых энергоблоков существенно улучшает качество собираемой информации. По опыту эксплуатации потенциометрические датчики имеют множественные отказы, связанные с выбросами на величины до 30мм, зависание и пульсации показаний датчиков и просто отказы, что делает невозможным расчет перемещений. В настоящий момент в САКОР-320 новых АЭС с РУ В-320 функция учета реальных перемещений в повреждаемости выключена. Выполняется только расчет критериальных параметров перемещения патрубков ПГ с дальнейшим экспертным анализом входных и выходных данных ПО расчета перемещений САКОР-320.

Для реализации функции контроля перемещений необходима модернизация системы контроля гидроамортизаторов и доведения ее до современного уровня.

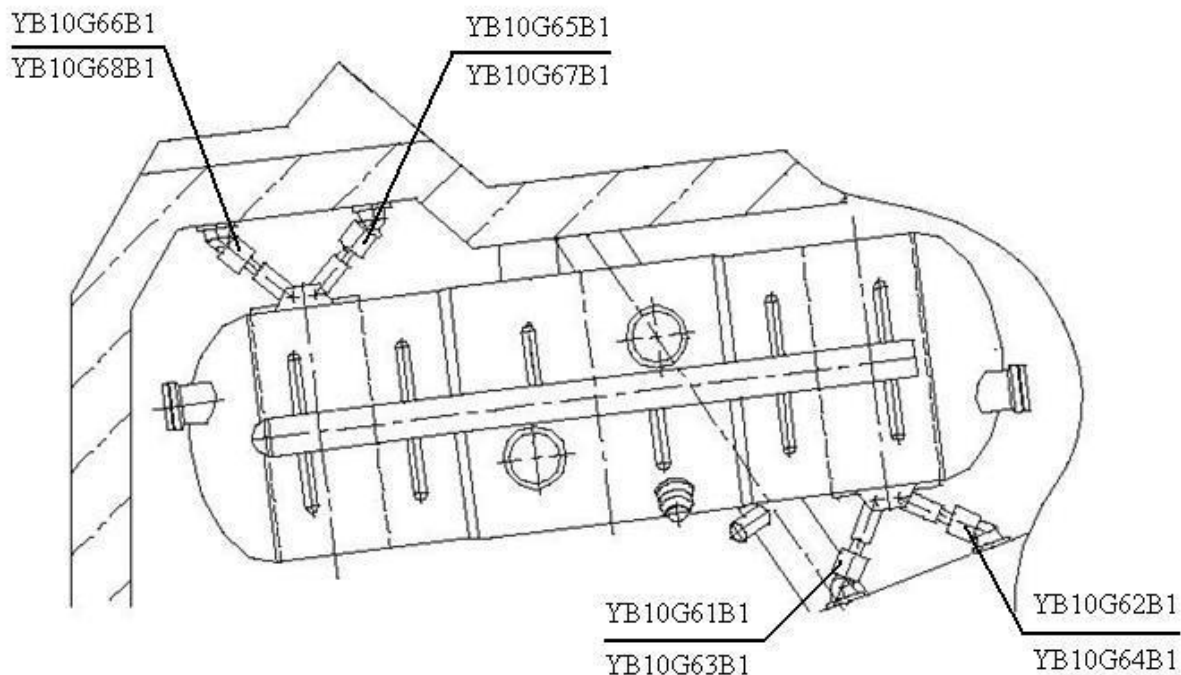


Рис. 1 - Размещение ГА на корпусе ПГ-1 и места их крепления к стенам РО для РУ В-320

Для контрольных точек в зонах смешения теплоносителей с различной температурой, связанных с возникновением термопульсаций и стратификации теплоносителя предусматриваются дополнительные поверхностные ТСП, устанавливаемые по сечению трубопровода на съемных креплениях в виде хомутов.

- по два поверхностных ТСП, в верхней и нижней точке сечения, на трубопроводах питательной воды на расстоянии ~ 200 мм от патрубков ПГ 1– 4;
- по два поверхностных ТСП, в верхней и нижней точке сечения, на трубопроводе впрыска системы компенсации давления на расстоянии ~ 200 мм от патрубка КД;
- поверхностный ТСП, в нижней точке сечения, на соединительном трубопроводе (СТ) системы компенсации давления (горизонтальный участок, ближайший к КД);
- поверхностные ТСП, в нижней точке сечения, на трубопроводах системы подпитки на расстоянии ~ 200 мм от патрубков врезки в холодную нитку ГЦТ 1 – ГЦТ 4.

Разработана специализированная конструкция хомута для исключения возможности провисания (неплотного контакта с трубопроводом) и закусывания разъемных элементов. Хомут выполнен в подпружиненном варианте, чтобы обеспечивать температурную компенсацию от термоударов во время эксплуатации при разнице температур между хомутом и трубой не менее выявленных по опыту эксплуатации, что подтверждено расчетом. Дополнительно выполнен расчет прочности хомута. В комплект поставки входит инструкция по монтажу, в которой предусматриваются выставление первоначальных усилий в холодном состоянии. Материалы и геометрия хомутов и трубопроводов, на которые они устанавливаются, выбраны, так чтобы уменьшить различие в коэффициентах температурного расширения.

2 Организация сбора информации по показаниям датчиков и вызова ПО.

САКОР-320 применительно к РУ В-320 работает с использованием локальной вычислительной сети (ЛВС), которая соединена с ИВС, СВРК через ИВС, ВК СКТПГ и ПК БЩУ. Общая структура организации передачи информации на сервер САКОР-320 представлена на рисунке 1. На схеме стрелками указаны кабели коммуникационной связи между системами. Серым цветом отмечены технические средства, входящие в состав САКОР-320.

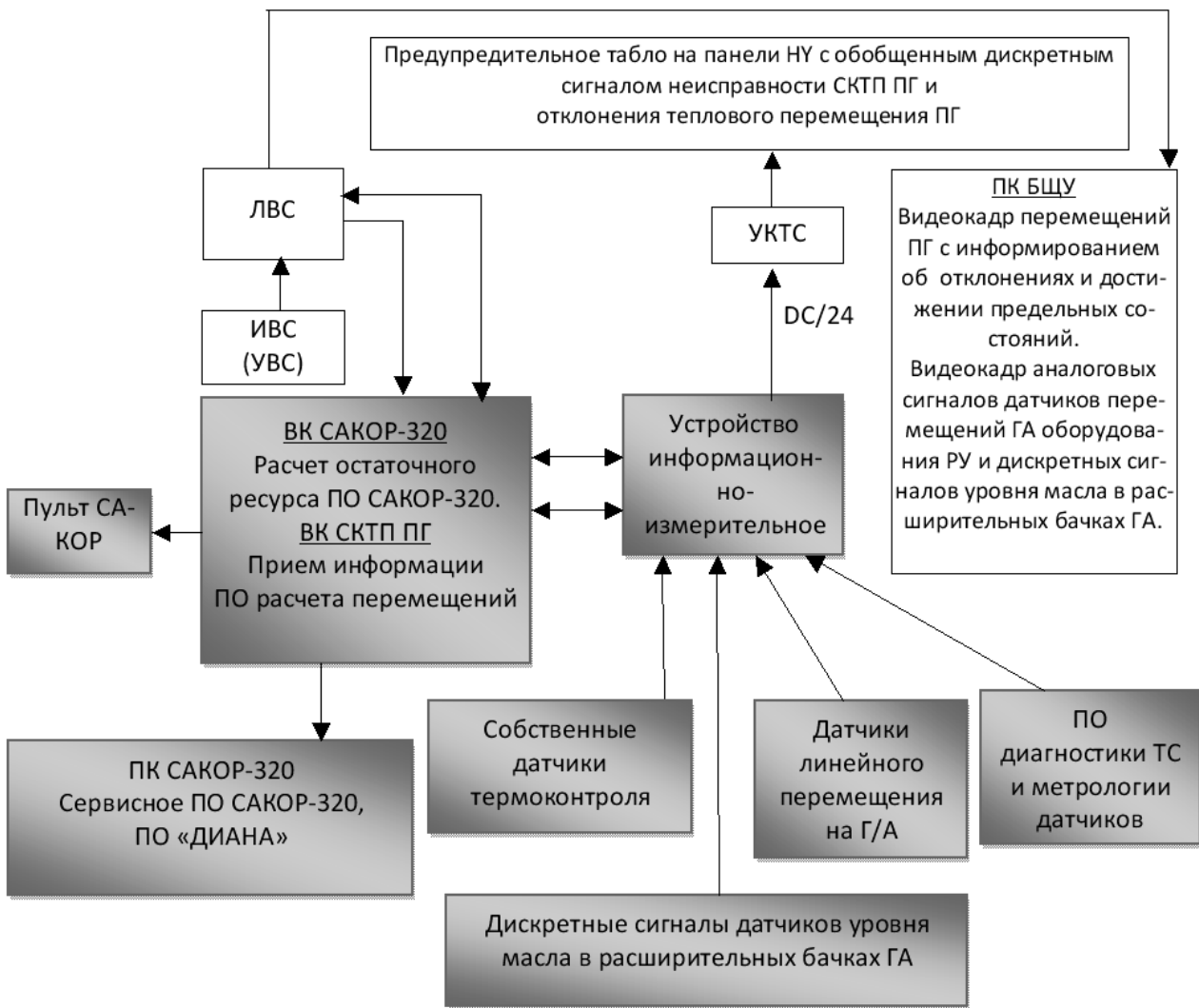


Рис. - 2 - Принципиальная схема функциональной структуры САКОР-320

Прием информации по показаниям ДЛП, датчиков уровня и ТСП выполняет УИИ, которое производит оцифровку аналоговых и дискретных сигналов от этих датчиков, а затем по двум каналам передает их в СКТП ПГ. На УИИ установлено программное обеспечение для обслуживания УИИ состоит из программы функционирования (ПФ) УИИ, ПО технологического компьютера для проведения калибровки измерительных каналов УИИ и ПО технологического компьютера для настройки блоков ввода аналоговых сигналов УИИ.

ПО приема-передачи информации (ПО ППИ), размещенное на двух системных блоках СКТП ПГ, является основным «on-line» управляющим модулем САКОР-320. ПО ППИ осуществляет прием информации от УИИ по показаниям ДЛП, датчиков уровня и ТСП, а также вызывает видеокадр значений аналоговых сигналов датчиков перемещений ГА оборудования РУ и дискретных сигналов уровня масла в расширительных бачках ГА реализован на базе графических схем, подобных представленной на рисунке 1. ПО ППИ осуществляет прием информации от ЛВС также по двум параллельным каналам и формирует общий массив входных данных САКОР-320, необходимый для работы всех модулей ПО и видеокадров. ПО ППИ подает на вход «on-line» ПО расчета перемещений необходимые показания датчиков с частотой 10 с, которое рассчитывает критериальные параметры перемещения корпусов ПГ в виде перемещений патрубков ГЦТ на ПГ и угла поворота. ПО ППИ также формирует входной файл структуры типа 1 [1] для ПО расчета остаточного ресурса. В дальнейшем планируется организовать автоматический периодический запуске ПО ППИ ПО расчета остаточного ресурса. Выходной информацией ПО расчета остаточного ресурса помимо протокола с результатами расчета остаточного ресурса являются файлы файловой структуры типа 2, со-

держание значения показаний датчиков, нагружающих факторов и напряжений в зависимости от времени. ПО ППИ осуществляет передачу файлов файловой структуры типа 1 на ПК САКОР-320, необходимых в качестве входной базы данных для ПО «ДИАНА» и файлы файловой структуры типа 2 необходимых в качестве входной базы данных для сервисного ПО САКОР-320.

3 Выявление «on-line» непроектных перемещений по критерию нагруженности.

ПО расчета перемещений выполняет функцию «on-line» расчета критериальных параметров перемещения корпусов ПГ, выбранных по критерию нагруженности. Для того чтобы знать нагрузки в ГЦТ необходимо знать краевые условия, которыми являются перемещения в горизонтальной плоскости и угол поворота вокруг своей оси горячего и холодного патрубка ГЦТ на ПГ.

В качестве критериальных параметров (определяющих напряжения в горячей нитки ГЦТ) взяты перемещение поперек оси горячей нитки ГЦТ, угол поворота горячего патрубка ГЦТ на ПГ и перемещение вдоль оси горячей нитки ГЦТ без учета ее температурного удлинения.

Далее ПО расчета перемещений проводит выявления непроектных перемещений оборудования РУ с графическим представлением на сервере СКТП ПГ и на видеокадре ПК БЦУ этих критериальных параметров и их предельных значений. Вид графиков критериальных параметров выдаваемых «on-line» на монитор СКТП ПГ и ПК БЦУ представлен на рисунке 3.

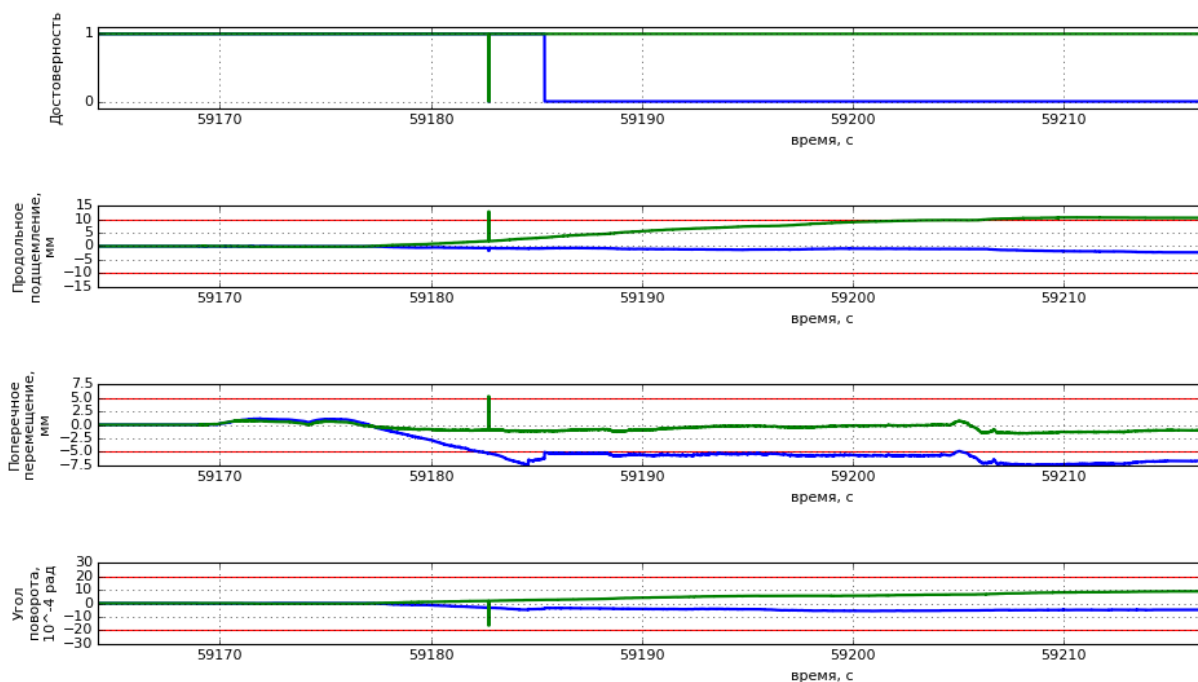


Рис. 3 – Зависимости критериальных параметров от времени в процессе расхолаживания

Расчет проводится в соответствии с методикой изложенной в [2]. В дополнение к методике разработаны алгоритмы учета нелинейности расчета, связанной с большими углами поворота гидроамортизаторов, которая для РУ В-320 может составлять до 3 мм бокового отклонения от оси ГЦТ. Дополнительно с целью повышения надежности расчет ведется по двум рядам ГА и дополнен функциями проверки достоверности полученных результатов и оценки погрешности. Также проводится проверка правильности расчета по перемещениям ГЦН, которые рассчитываются по пяти ДЛП на ГА каждого из ГЦН. При расчете температурного удлинения горячей и холодной нитки ГЦТ рассчитывается средняя температура металла трубопровода с использованием интеграла Дюамеля, что позволяет в режимах с быст-

рым изменением температуры (более $0,04 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$) теплоносителя в ГЦТ отслеживать процесс запаздывания прогрева металла.

4 Выявление повышенных температурных нагрузок.

Установленные в составе САКОР-320 поверхностные ТСП позволяют проводить выявление повышенных температурных нагрузок на трубопроводы и патрубки оборудования. Для этой цели используется ПО диагностики нагруженности (ПО «ДИАНА»).

На рисунке 4 представлено главное окно сервисной части ПО «ДИАНА», появляющееся на мониторе ПК САКОР-320, после вызова исполняемого модуля.

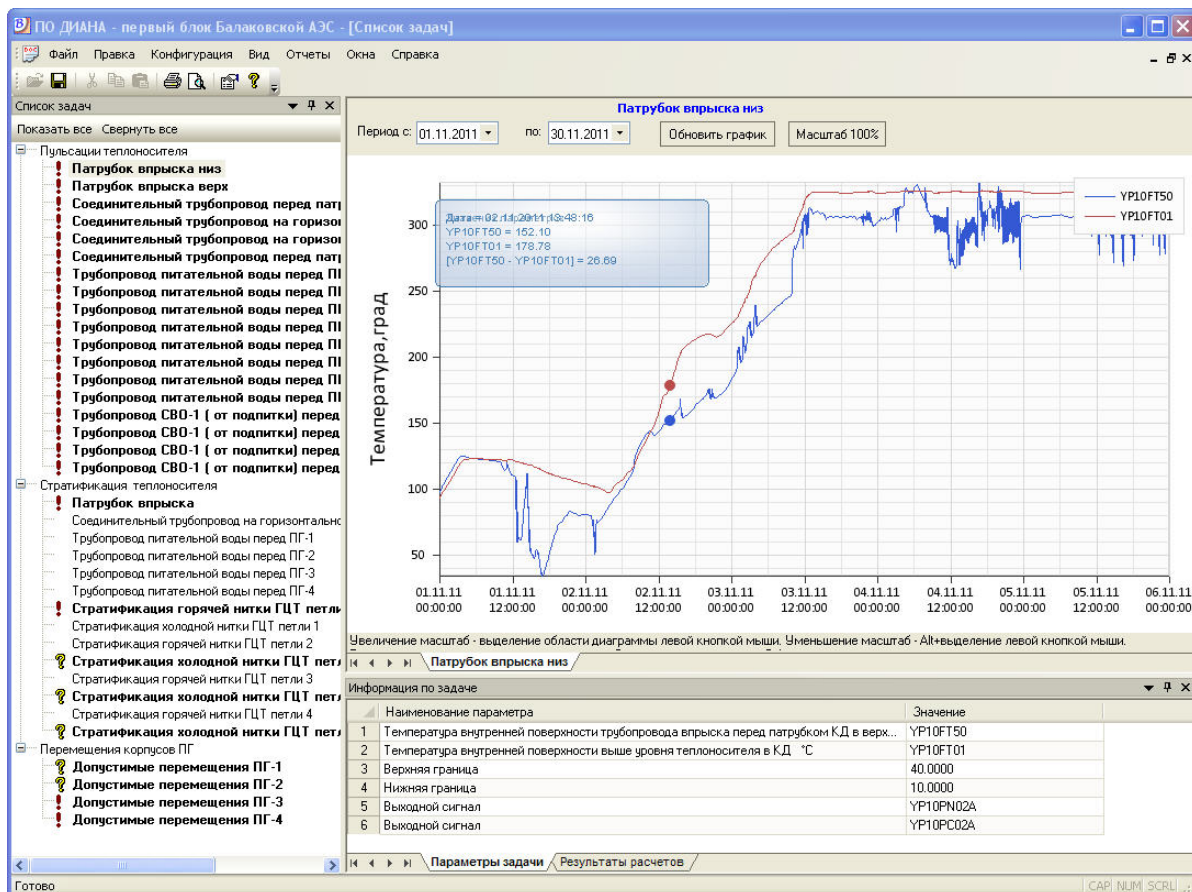


Рисунок 4 - Главное окно сервисной части ПО «ДИАНА»

ПО «ДИАНА» проводит выявление циклов изменения температуры теплоносителя с фиксацией их амплитуд и количества, а также с сохранением времени начала и окончания цикла на СТ возле патрубков КД и ГЦТ, в верхней и нижней точках сечения на горизонтальном участке ближнем к КД, в верхней и нижней точке сечения трубопроводов питательной воды ПГ 1-4 возле патрубков, в верхней и нижней точке сечения трубопровода впрыска в КД возле патрубка, на трубопроводах подпитки возле патрубков приварки к ГЦТ 1-4 [3].

По окончании расчета формируется диагностический сигнал о превышении (не превышении) количества допустимых циклов по температурным пульсациям и термоудары, с выдачей его в протокол, размещаемый на ПК САКОР-320 ПО «ДИАНА» проводит выявление максимальных значений перепадов температур, распределенных по линейному закону для выяснения максимальной расчетной нагрузки от стратификации на СТ на горизонтальном участке ближнем к КД, на трубопроводе впрыска в КД, на трубопроводах питательной воды ПГ 1-4. По окончании расчета формируется диагностический сигнал о превышении максимальной величины стратификации теплоносителя, зафиксированной до этого, а значе-

ние максимальной величины стратификации теплоносителя заносится в протокол, размещаемый на жестком диске ПК САКОР-320.

5 Выбор контрольных точек на оборудовании, включая зоны начальных несовершенств.

Следующей задачей, которую необходимо решить для управления ресурсными характеристиками является обеспечение полноты зон и точек контроля повреждения по различным механизмам.

Для контроля усталостного повреждения оборудования КД, ПГ и реактор составляется перечень критических элементов и узлов основного оборудования и трубопроводов первого контура РУ с точки зрения проектного усталостного циклического повреждения, и выбираются точки, подлежащие контролю в рамках определения остаточного ресурса. Первоначально выбор критических узлов и контрольных точек проводится на основе анализа результатов поверочных проектных расчетов.

В САКОР вносятся контрольные точки в местах теплосмен, к которым относятся патрубки подачи теплоносителя в оборудование РУ из трубопроводов. При этом подача теплоносителя может быть как активной, так и пассивной. Отдельно решен вопрос по количеству контрольных точек на патрубке впрыска в КД, патрубке питательной воды и патрубке соединительного трубопровода на КД, которые характеризуются возникновением стратификации [4].

Контрольные точки на сварных соединениях трубопроводов с обнаруженными несплошностями в процессе эксплуатационного контроля подлежат контролю по критерию усталостного роста дефектов. В контролируемые зоны вносятся сварные соединения трубопроводов РУ для проверок выполнения критериев «течь перед разрушением» в процессе эксплуатации.

Зоны возникновения повреждений по опыту эксплуатации также включаются в перечень контрольных точек. К этим зонам относятся - зона радиусного перехода в кармане коллектора ПГ, сварные соединения с конструктивным непроваром рубашки на патрубках СУЗ на крышке реактора, теплообменные трубки ПГ. Для кармана коллектора в качестве нагружающих факторов учитываются непроектные перемещения ПГ.

6 Краткое описание ПО расчета остаточного ресурса САКОР-320

Оценку остаточного ресурса САКОР проводит в представительном наборе контрольных точек на всем оборудовании РУ, по предельным состояниям выбранных на основании доминирующего механизма разрушения для каждой контрольной точки и зоны. ПО расчета остаточного ресурса САКОР-320 размещается на сервере ВК САКОР-320 и запускается по команде оператора, которое считывает накопленные входные файлы и по всем проводит расчет остаточного ресурса кроме текущей даты. Для этого проводится расчет по показаниям датчиков нагружающих факторов, расчет по нагружающим факторам приведенных напряжений в контрольных точках и зонах.

Для получения достоверных результатов по эксплуатационному нагружению, САКОР-320 учитывает все возможные нагружающие факторы, а также разработаны методы их определения по показаниям датчиков. При расчете напряжений учитываются нагрузки от веса, давлений первого и второго контуров, температурная компенсация трубопроводов в условиях реального перемещения оборудования и стратификации теплоносителя, термодилатации с учетом стратификации теплоносителя во всех эксплуатационных режимах.

Схематизация циклов нагружения выполняется по методу «дождя» [5]. Определение условно-упругих напряжений по приведенным напряжениям, коэффициентов интенсивности напряжений, расчет накопленного усталостного повреждения и роста дефектов для каждого полуцикла, а также расчет предельных состояний по циклической, вязкой и хрупкой прочности, выбор коэффициентов запаса выполняется в соответствии с нормативными подходами.

Расчет усталостного подрастания дефектов, обнаруженных в процессе НК, по реальному эксплуатационному нагружению проводится за один день с добавлением результатов в соответствующие базы данных. Расчет эквивалентных напряжений организуется во всех сварных соединениях, указанных в перечне контрольных точек, в котором указаны идентификаторы нагружающих параметров, используемых при расчете эквивалентных напряжений в данном сварном соединении. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и подрастания дефектов организованы в виде циклической процедуры, где в каждом следующем расчете подрастания дефектов, используется с предыдущего шага КИН и размеры дефекта, по которым он вычислен. При проверке выполнения критериев хрупкой и вязкой прочности сварных соединений с имеющейся дефектностью оборудования и трубопроводов проводится оценка коэффициентов запаса с учетом подрастания дефектности. Все расчеты ведутся в соответствии с [6].

7 Краткое описание сервисного ПО САКОР-320

Сервисные функции ПО САКОР-320, предназначенные для проверки правильности настройки ПО САКОР-320, позволяют оператору контролировать правильность использования баз данных информационного обеспечения САКОР. На рисунке 5 представлены показания ДЛП выдаваемых сервисным ПО САКОР-320.

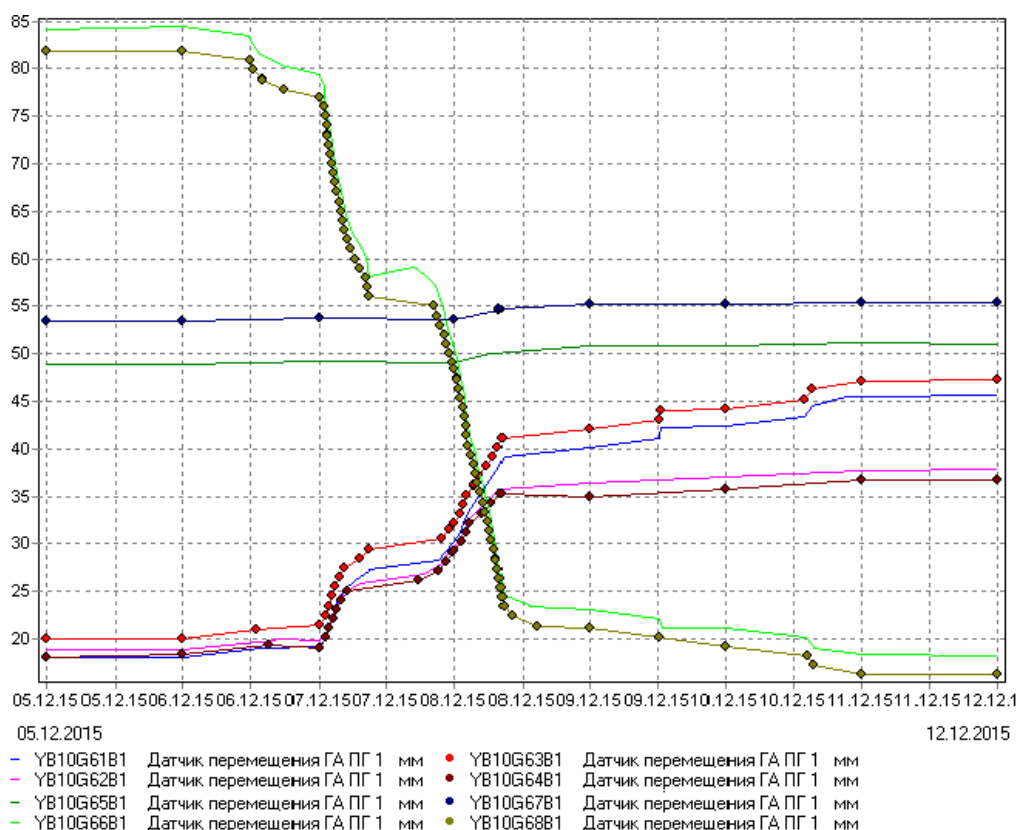


Рис.5 – Графики показаний ДЛП ПГ-1, выдаваемых сервисным ПО САКОР-320

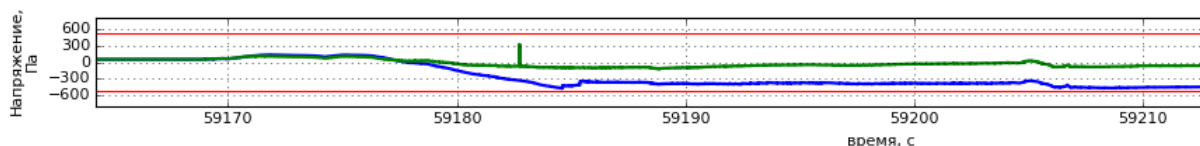
Как видно из графиков отсутствуют сбойные значения и показания ДЛП с двух уровней ГА практически совпадают. Необходимо также отметить, что вовремя монтажа теплоизоляции не был поврежден ни один датчик и не потребовалось дополнительных мероприятий по восстановлению работоспособности ДЛП на ГА.

В качестве сервисных функций в программном обеспечении системы САКОР-320 предусмотрен просмотр баз данных информационной поддержки оператора. К таким базам данных относятся: перечень контрольных точек, рисунки узлов с указанием на них кон-

трольных точек, перечень штатных датчиков. Данные сервисные функции имеются на прикладном ПО САКОР-320, установленном на сервере САКОР-320.

7 Контроль напряженного состояния зоны соединения горячего коллектора с ПГ.

Для диагностики напряженного состояния зоны соединения горячего коллектора с ПГ в соответствии с [7] определены все нагружающие факторы, действующие на зону повреждения, и определена зависимость местных напряжений от нагружающих факторов. Нагружающими факторами, действующим на зону соединения коллектора с патрубком ПГ являются следующие: - давление первого и второго контуров, перемещение патрубка ГЦТ на ПГ поперек оси ГЦТ, подщемление в опорах при температурном расширении ГЦТ, поворот ПГ вокруг вертикальной оси, компенсационные усилия и моменты на патрубке ГЦТ от температурного расширения реактора и перепад температур между первым контуром, температурой воды в кармане ПГ и температурой металла вдоль нижней образующей парогенератора [8]. На рисунке 6 представлено изменение осевых напряжений во времени на радиусном переходе в зоны соединения горячего коллектора с ПГ. Красные линии обозначают предельно допустимые значения.



t,с.

Рис.6 - Изменение осевых напряжений (МПа) во времени на радиусном переходе в зоны соединения горячего коллектора с ПГ

Выводы: Внедрение на этапе продления срока службы энергоблока АЭС системы автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР) совместно с системой контроля ГА, оснащенной комплексом взаимосвязанного ПО, позволит:

1 Обеспечить удобство персоналу в обслуживании установленных ДЛП, ТСП, а также качество получаемой с них информации для контроля перемещений главного циркуляционного контура, нагрузок от температуры теплоносителя и остаточного ресурса.

2 Качественно «on-line» контролировать проектную работу ГА.

3 Выявлять «on-line» во всех эксплуатационных режимах нештатные перемещения оборудования РУ и учитывать реальные перемещения оборудования РУ для контроля остаточного ресурса.

4 «On-line» контролировать напряженное состояние зоны соединения горячего коллектора с корпусом ПГ.

5 Своевременно выявлять зоны возникновения термопульсации, термоударов, стратификации и своевременно сигнализировать персоналу АЭС о необходимости настройки регуляторов.

6 Контролировать накопленное усталостное повреждение по всему оборудованию РУ в автоматизированном режиме по реальным нагрузкам.

7 Контролировать развитие имеющейся (выявленной НК) и постулируемой, в том числе в рамках процедуры «verlife», дефектности по реальному погружению с оценкой предельных состояний и остаточного ресурса.

8 С использованием сервисных функций выявлять причины возникновения повышенного повреждения оборудования и трубопроводов и разрабатывать компенсирующие мероприятия.

Весь комплекс работ позволит управлять ресурсными характеристиками оборудования РУ с использованием САКОР, связав его с НК и техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР), что особенно важно для блоков находящихся в длительной эксплуатации

Список литературы

- 1 В.Я.Беркович, А.В. Богачев, Б.Н. Дранченко, В.П. Семишкин. Использование для решения эксплуатационных задач АЭС с ВВЭР системы автоматизированного контроля остаточного ресурса. Международный научно-технический журнал. Проблемы прочности № 1 2010 г. стр. 62-69
- 2 А.В. Богачев, В.Я. Беркович, Б.Н. Дранченко, В.П. Семишкин. Определение нагружающих факторов для расчета напряжений в САКОР применительно к проекту РУ АЭС-2006. 5-ая Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», г. Подольск. 29мая –1 июня 2007 г.
- 3 В.Я.Беркович, А.В. Богачев, В.П. Семишкин, Д.Б. Муравин, А.И. Черняков. Результаты внедрения на 2-ом энергоблоке Ростовской АЭС системы автоматизированного контроля остаточного ресурса нового поколения (САКОР-320). МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций», Киев, Украина, 28-30 сентября 2010 г.
- 4 В.Я.Беркович, А.В. Богачев, В.П. Семишкин, Д.Б. Муравин, А.И. Черняков. Результаты внедрения на 2-ом энергоблоке Ростовской АЭС системы автоматизированного контроля остаточного ресурса нового поколения (САКОР-320). МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций», Киев, Украина, 28-30 сентября 2010 г.
- 5 Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статического представления результатов. ГОСТ 25.101-83.
- 6 Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы, РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012, Москва, 2012.
- 7 Н.В. Шарый, В.П. Семишкин, В.А. Пиминов, Ю. Г. Драгунов, «Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР» М.: ИздАТ, 2004.
- 8 Богачев А.В, Дранченко Б.Н., Беркович В. Я. Контроль напряжений в зоне приварки коллектора к корпусу ПГВ-1000 в процессе эксплуатации системой САКОР. Серия «Обеспечение безопасности АЭС». Вопросы атомной науки и техники. Научно-технический сборник. Выпуск 19. Реакторные установки ВВЭР. Подольск. 2007 г., стр. 43-54.