

ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ПО ПРОВЕРКЕ СООТВЕТСТВИЯ КООРДИНАТ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ КООРДИНАТАМ ЭТИХ ДАТЧИКОВ В ПТК СВРК

Ю.В.Саунин, А.Н.Добротворский, А.В.Семенихин
филиал "НОВОВОРОНЕЖАТОМТЕХЭНЕРГО" ОАО "АТОМТЕХЭНЕРГО",

В статье обобщен опыт и представлены результаты анализа одного из видов комплексных испытаний системы внутриреакторного контроля выполненных в ходе пусконаладочных работ на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 разных проектов. Показана принципиальная возможность и даны предложения по оптимизации и существенному сокращению временных затрат на проведение данного испытания при вводе в эксплуатацию и при промышленной эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР.

OPTIMIZATION OF TEST ON CHECK OF CORRESPONDENCE OF COORDINATES OF SENSORS OF TEMPERATURE AND ENERGY-RELEASE IN A CORE TO COORDINATES OF THESE SENSORS IN PTC ICMS. Yu.V. Saunin, A.N. Dobrotvorsky, A.V. Semenihih (Branch of JSC "ATOMTECHENERGO" "NOVOVORONEZHATOMTECHENERGO")

In paper experience is generalized and results of the analysis of one of kinds of complex tests of in-core monitoring system executed during commissioning works on the NPP with reactors WWER-1000 of different projects are presented. The basic opportunity is shown and offers on optimization and essential reduction of time expenses for carrying out of the presented test are given at commissioning and at commercial operation of power units of the NPP with reactors WWER.

Введение

Опыт ввода в эксплуатацию и эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР показывает, что возможны ситуации, когда в штатном программно-техническом комплексе системы внутриреакторного контроля (ПТК СВРК) могут неправильно идентифицироваться координаты расположения в активной зоне сборок или отдельных внутриреакторных датчиков. Причинами, вызывающими неправильную идентификацию, могут быть ошибки при монтаже линий связи и технических средств СВРК и/или ошибки при привязке прикладного программного обеспечения СВРК к объекту контроля и используемой измерительной системе.

Неправильная идентификация координат внутриреакторных датчиков приводит к неадекватному отражению СВРК реального состояния активной зоны, что может отрицательно сказываться на безопасности и экономичности эксплуатации реакторной установки. Такие ситуации могут быть ещё усложнены и другими причинами, влияющими на корректность контроля состояния активной зоны, например, недостоверностью исходной информации по положению органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Для получения опытной информации, позволяющей сделать однозначные выводы о правильности идентификации координат внутриреакторных датчиков, программами ввода в эксплуатацию энергоблоков АЭС с ВВЭР в составе комплексных испытаний СВРК предусматриваются специальные испытания. Это испытания по проверке соответствия координат датчиков температуры и энерговыделения, размещенных в активной зоне, координатам этих датчиков в ПТК СВРК. Подобные испытания проводятся, при необходимости, и при промышленной эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР при пуске и наборе мощности после остановов на планово-предупредительные ремонты.

Используемые до настоящего времени методики проведения данных испытаний требуют больших временных затрат. Для оценок возможностей оптимизации объема подобных испытаний и соответствующего значимого сокращения временных затрат на пусконаладочные и сервисные работы проведено обобщение опыта и проанализированы результаты испытаний, выполненных в последнее время. Представляются данные, полученные при вводе в эксплуатацию энергоблоков с разными проектами реакторной установки (В-320 – энергоблок №3 Калининской АЭС, В-428 – энергоблоки №1, 2 Тяньваньской АЭС) и модернизированной СВРК на базе новых программно-технических средств.

Методика испытаний

Для активных зон ВВЭР характерна симметрия топливных загрузок и, соответственно, симметричное распределение энерговыделения в активной зоне реактора [1]. При вводе энергоблоков в эксплуатацию симметричность первых топливных загрузок подтверждается проведением физических экспериментов по определению величины асимметрии размножающих свойств активной зоны на этапе физического пуска. Методика испытаний по проверке соответствия координат датчиков термоконтроля и энерговыделения в активной зоне координатам этих датчиков в ПТК СВРК основана на преднамеренном создании существенных асимметричных распределений энерговыделения в активной зоне, которые достигаются опусканием отдельных ОР СУЗ. Компенсация изменения реактивности вследствие перемещения отдельного ОР СУЗ осуществляется работой автоматического регулятора мощности реактора (АРМ). Таким образом, интегральная мощность реактора в процессе перемещения ОР СУЗ поддерживается постоянной в диапазоне регулирования АРМ.

В качестве примера, на рисунке 1 по данным, полученным в ходе испытаний при пуске энергоблока №2 Тяньваньской АЭС, приведены характерные изменения относительной мощности (KQ) тепловыделяющих сборок (ТВС) при перемещении одного из ОР СУЗ.

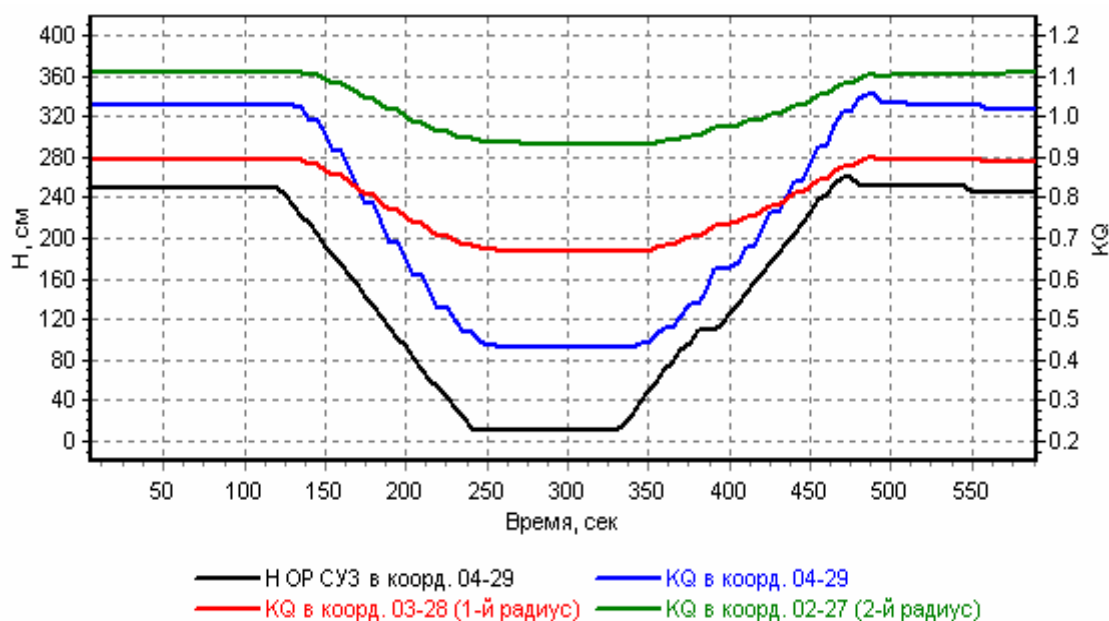


Рис.1. Изменения KQ отдельных ТВС при опускании ОР СУЗ с координатой 04-29.

На рисунке 2 также по данным, полученным в ходе испытаний при пуске энергоблока №2 Тяньваньской АЭС, показаны картограммы активной зоны с изменениями KQ при опускании ОР СУЗ в двух симметричных ТВС (координаты 04-29 и 06-35) при отсутствии замечаний к правильности идентификации координат внутриреакторных датчиков. Характер возникающих деформаций таков, что наряду с резким уменьшением энерговыделения в ТВС с ОР СУЗ по сравнению с симметричными ей наблюдается уменьшение энерговыделения и в ТВС ближайшего окружения. По направлению к противоположной стороне активной зоны от места опускания ОР СУЗ возникает плавное слабое увеличение энерговыделения. Как видно по представленным рисункам, оценка характера изменения распределения энерговыделения в активной зоне при опускании отдельных ОР СУЗ позволяет делать однозначные выводы о правильности идентификации координат внутриреакторных датчиков в ПТК СВРК.

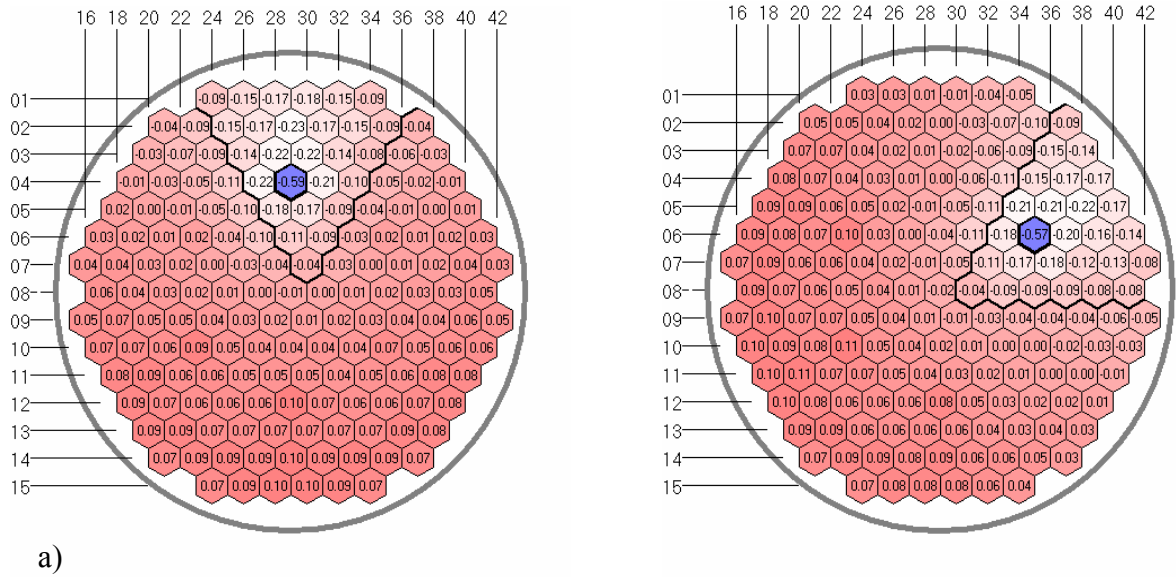


Рис.2. Изменения KQ при опускании ОР СУЗ в ТВС с координатой 04-29 (а) и 06-35 (б).

С учетом 60° симметрии топливных загрузок для подтверждения правильности идентификации координат внутриреакторных датчиков находятся отклонения относительных изменений KQ и подогревов теплоносителя (DT) в ТВС от средних относительных изменений в орбитах симметрии при опускании ОР СУЗ в симметричных ТВС по следующим формулам:

$$\Delta(\delta KQ_{ij}) = |\delta KQ_{ij} - \overline{\delta KQ_j}| \quad (1)$$

$$\Delta(\delta DT_{ij}) = |\delta DT_{ij} - \overline{\delta DT_j}| \quad (2)$$

где $\delta KQ_{ij} = \frac{KQ_{ijend} - KQ_{ijstart}}{KQ_{ijstart}}$ и $\delta DT_{ij} = \frac{DT_{ijend} - DT_{ijstart}}{DT_{ijstart}}$ - относительные из-

менения KQ и DT для ТВС i-го сектора симметрии (i = 1, 2, ..., 6) в j-ой орбите симметрии (j = 1, 2, ..., 28) при опускании ОР СУЗ в симметричной ТВС i-го сектора симметрии;

$KQ_{ijstart}$, KQ_{ijend} , $DT_{ijstart}$, DT_{ijend} - относительные мощности и подогревы ТВС i-го сектора симметрии в j-ой орбите симметрии перед опусканием и после опускания ОР СУЗ в ТВС i-го сектора симметрии;

$$\overline{\delta KQ_j} = \frac{\sum_{i=1}^6 \delta KQ_{ij}}{6} \text{ и } \overline{\delta DT_j} = \frac{\sum_{i=1}^6 \delta DT_{ij}}{6} \text{ - средние относительные изменения KQ и}$$

DT в ТВС j-ой орбиты симметрии при опускании ОР СУЗ в ТВС из одной орбиты симметрии.

Полученные отклонения сравниваются с критериями правильности идентификации датчиков энерговыделения (a_Q) и/или датчиков температуры (a_T), которые выбираются с учетом погрешности восстановления поля энерговыделения и априорной информации по относительным изменениям KQ и DT, полученной по результатам ранее выполненных испытаний или по имитационным расчетам, например, с помощью программы "Имитатор реактора" [3].

Следует отметить, что ранее подобный алгоритм оценок распределения энерговыделения в орбитах симметрии предполагался для использования в сервисном программном

обеспечении СВРК для обнаружения расцепленных ОР СУЗ [2]. До настоящего времени, исходя из консервативного подхода и отсутствия результатов системного анализа ранее проведенных испытаний, полный объем испытаний предусматривал, как правило, использование опусканий всех ОР СУЗ. Данный подход основывался на том, что системы контроля и управления старых проектов не позволяли получить исходную информацию в цифровом виде. Это обстоятельство накладывало ограничение, как на используемые методы обработки, так и на возможность применения специализированного для данных испытаний программного обеспечения. В частности, при обработке исходной информации проводился расчет относительных изменений только в ТВС ближайшего окружения по отношению к опускаемому ОР СУЗ. Объем испытаний с использованием всех ОР СУЗ требует до 1.5 суток чистого времени (затраты на выполнение только процедур непосредственно связанных с проведением испытаний) на этапе освоения уровня мощности 50% от номинальной мощности. При этом, соответственно, задерживается и вывод пускаемого энергоблока на номинальную мощность и его сдача в промышленную эксплуатацию.

Особенности состава и расположения внутриреакторных датчиков и ОР СУЗ в реакторах ВВЭР разных проектов

В серийных реакторах ВВЭР-1000 (проект РУ В-320) и реакторах ВВЭР-1000 малой серии (проекты РУ В-302, В-338) в СВРК для контроля энерговыделения в активной зоне и температуры теплоносителя на выходе из ТВС используются каналы нейтронно-измерительные (КНИ) и термопары (ТП), размещаемые в направляющих каналах блока защитных труб. В КНИ равномерно по высоте ТВС расположены семь датчиков прямой зарядки (ДПЗ). Термопары на выходе имеют 95 ТВС, КНИ установлены в 64 ТВС при общем числе ТВС в активной зоне 163 и 61 ОР СУЗ.

В новых реакторах ВВЭР-1000 (проекты РУ В-428, В-446, В-412) и ВВЭР-1200 (проекты АЭС-2006) для внутриреакторного контроля используются, и предполагается использование 54 сборок внутриреакторных детекторов (СВРД), в которых размещены, как ДПЗ аналогично КНИ, так и ТП. В 46 СВРД установлены ТП для контроля температуры на входе и на выходе из ТВС, в четырех СВРД – ТП для контроля температуры на выходе из ТВС и под крышкой реактора, в четырех СВРД - ТП для контроля появления уровня теплоносителя в реакторе в аварийных режимах. При одинаковом с серийным реактором ВВЭР-1000 общем числе ТВС количество ОР СУЗ для реакторов новых проектов увеличивается и может быть свыше 85.

Таким образом, реакторы ВВЭР разных проектов имеют существенные отличия и особенности по составу, количеству и расположению в активной зоне внутриреакторных датчиков и ОР СУЗ. Следовательно, специфика разных проектов должна обязательно приниматься во внимание при оценке возможностей оптимизации и сокращения объема испытаний по проверке соответствия координат датчиков температуры и энерговыделения, размещенных в активной зоне, координатам этих датчиков в ПТК СВРК.

Результаты испытаний и их обсуждение

Исходя из проектных особенностей, в объем испытаний на блоке №3 Калининской АЭС вошли опускания всех 61 ОР СУЗ, а на блоках №1, 2 Тяньваньской АЭС - 67 ОР СУЗ из 85. На рисунке 3 представлены распределения относительных изменений KQ в секторах симметрии при опускании ОР СУЗ 6, 7 и 10 групп по результатам испытаний на блоке №3 Калининской АЭС. ОР СУЗ указанных групп расположены в периферийной, центральной и средней области 60° сектора симметрии. Относительные изменения KQ , а также относительные изменения DT при опускании ОР СУЗ других групп аналогичны представленным характерным изменениям при опусканиях ОР СУЗ в трёх областях сектора симметрии. В таблицах 1-3 представлены минимальные относительные изменения KQ и DT ($\min \delta KQ$ и $\min \delta DT$), а также максимальные отклонения относительных из-

менений KQ и DT от средних относительных изменений в орбитах симметрии ($\max \Delta(\delta KQ)$ и $\max \Delta(\delta DT)$) при опускании ОР СУЗ различных групп.

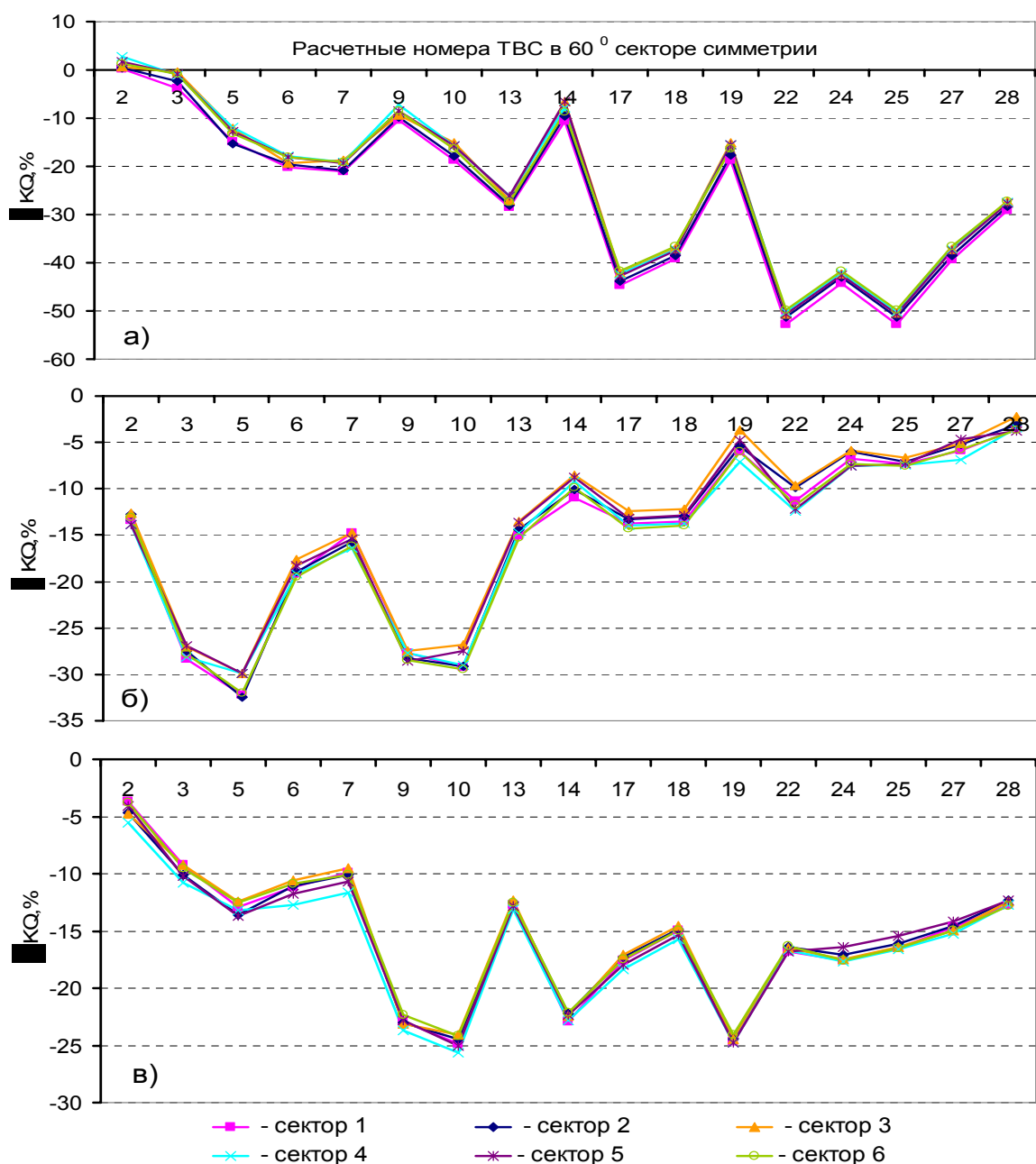


Рис.3. Распределения относительных изменений KQ в секторах симметрии при опускании ОР СУЗ 6 группы (а), 7 группы (б) и 10 группы (в). Калининская АЭС, блок №3.

Анализ данных по испытаниям на трех энергоблоках с разным составом и расположением внутриреакторных датчиков показывает, что относительные изменения KQ и DT имеют, в основном, три характерных распределения в секторах симметрии в зависимости от места опускания ОР СУЗ. Эти распределения можно назвать распределениями при опускании ОР СУЗ в центральной, средней и периферийной областях сектора симметрии. Относительные изменения KQ и DT в ТВС зависят от эффективности опускаемых ОР СУЗ, от обогащения ТВС и от местоположения ТВС по отношению к опускаемому ОР СУЗ. Вместе с тем, отклонения относительных изменений от средних относительных изменений в орбитах симметрии при правильной идентификации координат внутриреакторных датчиков не превышают 6% для KQ и 7% для DT. Таким образом, эти значения,

полученные на основании экспериментальных данных, можно принять в качестве критериев a_Q и a_T при оценках по формулам (1, 2).

Таблица 1

Относительные изменения KQ и DT в ТВС с внутриреакторными датчиками при испытаниях на блоке №3 Калининской АЭС

Группа ОР СУЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
min δKQ , %	-29	-35	-36	-36	-36	-53	-32	-60	-62	-26
max $\Delta(\delta KQ)$, %	6	6	2	3	3	2	2	3	4	1
min δDT , %	-46	-48	-50	-53	-53	-62	-51	-68	-70	-53
max $\Delta(\delta DT)$, %	7	4	4	5	6	4	4	6	7	4

Таблица 2

Относительные изменения KQ в ТВС с внутриреакторными датчиками при испытаниях на блоке №1 Тяньваньской АЭС

Группа ОР СУЗ	1	2	3	4	6	7	8	9	10
min δKQ , %	-32	-64	-32	-63	-68	-68	-32	-70	-64
max $\Delta(\delta KQ)$, %	6	3	5	3	4	3	2	2	3

Таблица 3

Относительные изменения KQ в ТВС с внутриреакторными датчиками при испытаниях на блоке №2 Тяньваньской АЭС

Группа ОР СУЗ	1	2	3	4	6	7	8	9	10
min δKQ , %	-24	-58	-32	-59	-62	-63	-30	-66	-58
max $\Delta(\delta KQ)$, %	6	3	3	3	3	2	2	2	3

На основании результатов выполненного анализа следует, что опускание всех ОР СУЗ для целей подтверждения правильности идентификации координат внутриреакторных датчиков, дает избыточную информацию ввиду повторения характерных распределений при опускании разных ОР СУЗ и приблизительно одинаковой реакции внутриреакторных датчиков. Для достижения целей испытаний достаточно, чтобы по выполненным опусканиям ОР СУЗ на каждую орбиту с внутриреакторными датчиками приходилось, по крайней мере, два разных по характеру относительных изменения распределения энерговыделения. Данный вывод и позволяет ниже предложить возможные варианты оптимизации испытаний с учетом специфики проектов разных энергоблоков.

Для энергоблоков с реакторами ВВЭР новых проектов (В-428, В-446, В-412 и проекты АЭС-2006), где используются СВРД, оптимизация заключается в сокращении числа опускаемых ОР СУЗ с 67 до 12. Это, исходя из взаимного расположения СВРД и ОР СУЗ в активной зоне, опускание шести ОР СУЗ группы в средней области сектора симметрии (например, 10-я группа для проекта В-428) и шести ОР СУЗ любой группы в периферийной области сектора симметрии (например, 6-я, 7-я или 9-я группа для проекта В-428). При обработке исходной информации достаточно проводить оценку только относительных изменений KQ, т.к. датчики температуры и энерговыделения находятся в одной сборке и, следовательно, привязаны к одинаковой координате.

Для энергоблоков с серийными реакторами ВВЭР-1000 и реакторами ВВЭР-1000 малой серии, где датчики температуры и энерговыделения расположены в разных каналах, а также ввиду их большого количества, по сравнению с количеством датчиков и сборок в новых проектах, оптимизация заключается в сокращении числа опускаемых ОР СУЗ с 61 до 18. Это, исходя из взаимного расположения внутриреакторных датчиков и ОР СУЗ в активной зоне, опускание шести ОР СУЗ группы в средней области сектора симметрии (например, 10-я группа), шести ОР СУЗ любой группы в периферийной области сектора симметрии (например, 8-я или 9-я группы) и шести ОР СУЗ группы в центральной области сектора симметрии (например, 1-я группа и часть 8-й группы).

В ходе работ, связанных с анализируемыми испытаниями, было разработано и опробовано специализированное программное обеспечение для автоматизации обработки исходной информации, что позволяет существенно снизить временные затраты и на представление отчетной документации. При существующем подходе к регистрации и обработке информации временные затраты после проведения испытаний связаны с переносом зарегистрированной исходной информации со штатных систем контроля и управления на автономные персональные компьютеры, на которых устанавливается специализированное программное обеспечение. Таким образом, в перспективе возможно ещё большее сокращение временных затрат либо за счет внедрения опробованного специализированного программного обеспечения в штатные системы контроля и управления в состав существующего сервисного пакета, либо за счет расширения сетевых возможностей штатных систем.

Заключение

На основании обобщения опыта и анализа результатов испытаний в ходе пусконаладочных работ на трех энергоблоках с ВВЭР-1000 разных проектов, введенных в эксплуатацию в последнее время, предложены варианты по оптимизации объемов обязательных испытаний по проверке соответствия координат датчиков температуры и энерговыделения в активной зоне координатам этих датчиков в ПТК СВРК. Предложены варианты оптимизации, которые позволят сократить временные затраты только на проведение испытаний с 1.2 – 1.5 суток до 3 – 5 часов. Кроме этого, в перспективе дальнейшая оптимизация испытаний предполагает использование разработанного и опробованного специализированного программного обеспечения для обработки исходной информации, получаемой в ходе испытаний.

Список литературы

1. Сидоренко В.А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР. М., Атомиздат, 1977.
2. Спиркин Е.И., Грачев Е.В. Обнаружение расцепленных органов регулирования СУЗ ВВЭР-1000 на основе анализа показаний детекторов внутриреакторного контроля. Отчет о НИР ОЭ-2295/86. ВНИИАЭС, М.1986.
3. Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П. Программа "Имитатор реактора" для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000. Атомная энергия, 1998, т.84, вып.6, с. 560-563.