

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

Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В.

ОАО "Атомтехэнерго",

Нововоронежский филиал "Нововоронежатомтехэнерго", г. Нововоронеж

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 отрицательно сказывается либо на безопасности или экономичности эксплуатации реакторной установки. Ситуация может быть ещё усложнена тем, что неадекватное отражение реального состояния активной зоны может быть связано и с другими причинами, например, из-за недостоверности показаний датчиков положения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Во избежание подобных ситуаций и получения экспериментальной информации, позволяющей сделать однозначные выводы, программами ввода в эксплуатацию энергоблоков АЭС с ВВЭР в составе комплексных испытаний СВРК предусматриваются специальные испытания. Это испытания по проверке соответствия координат датчиков термоконтроля 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.

В работе представляются результаты анализа выполненных вышеуказанных испытаний при вводе в эксплуатацию энергоблока с разными проектами реакторной установок (РУ): энергоблок №3 Калининской АЭС (проект РУ В-320) и энергоблоки №1, 2 Тяньваньской АЭС (проект РУ В-428). Полученные результаты доказывают принципиальную возможность оптимизации и существенного сокращения временных затрат на проведение и обработку получаемых данных одного из самых трудоемких и длительных испытаний при вводе в эксплуатацию энергоблоков АЭС с ВВЭР с разными проектами реакторных установок.

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 приведены характерные изменения относительной мощности (KQ) тепловыделяющих сборок (ТВС) при перемещении одного из ОР СУЗ.

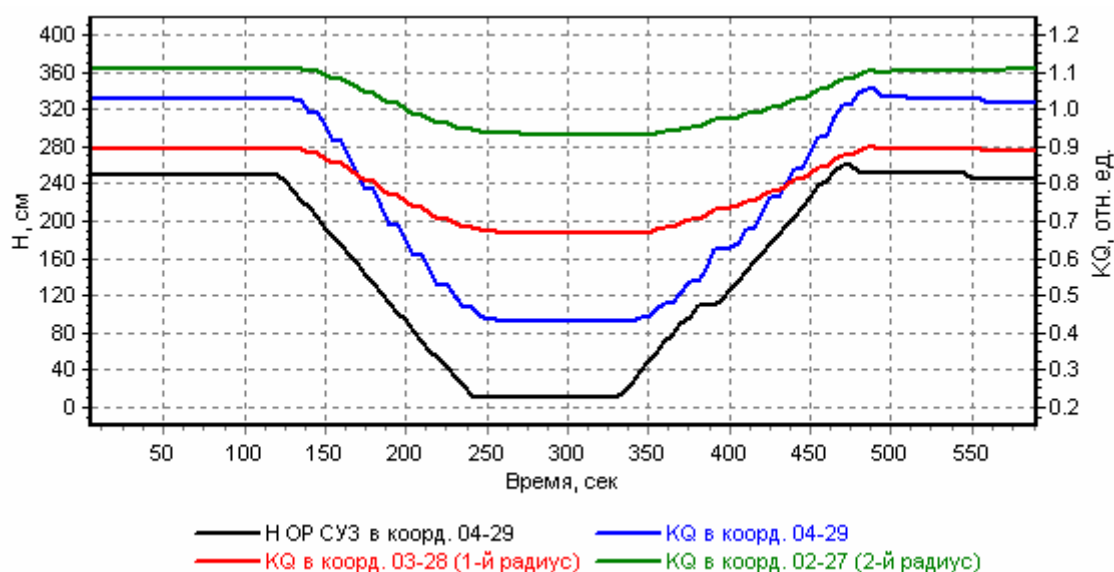


Рис.1. Изменения KQ отдельных ТВС при опускании ОР СУЗ с координатой 04-29. Тяньваньская АЭС, Блок №2.

На рисунке 2 показаны картограммы активной зоны с изменениями KQ при опускании ОР СУЗ в двух симметричных ТВС при отсутствии замечаний к 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, 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.

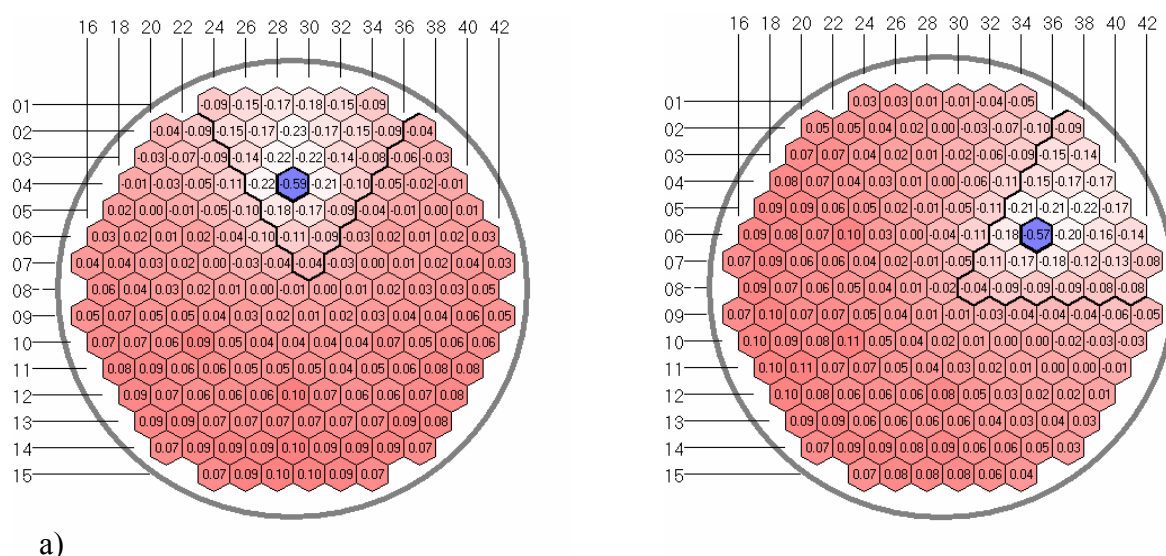


Рис.2. Изменения KQ при опускании ОР СУЗ с координатой 04-29 (а) и 06-35 (б). Тяньваньская АЭС, Блок №2.

С учетом 60° симметрии топливных загрузок для подтверждения правильности идентификации координат внутриреакторных датчиков находятся отклонения относительных изменений КQ 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 КQ и DT для ТВС i-ого 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;

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

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 КQ и DT, полученной по результатам ранее выполненных испытаний или по имитационным расчетам, например, с помощью программы "Имитатор реактора" [3].

Следует отметить, что 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. Однако, как показывает анализ результатов, полученных при испытаниях на энергоблоках, введенных в эксплуатацию в последнее время (блок №3 Калининской АЭС, блоки №1, 2 Тяньваньской АЭС), где применены современные системы контроля и управления, объем испытаний может быть существенно сокращен и оптимизирован без влияния на качество конечного результата.

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). Термопарами на выходе оснащены 95 ТВС, КНИ установлены в 64 ТВС при общем числе ТВС в активной зоне 163 и 61 ОР СУЗ (см. рис.3).

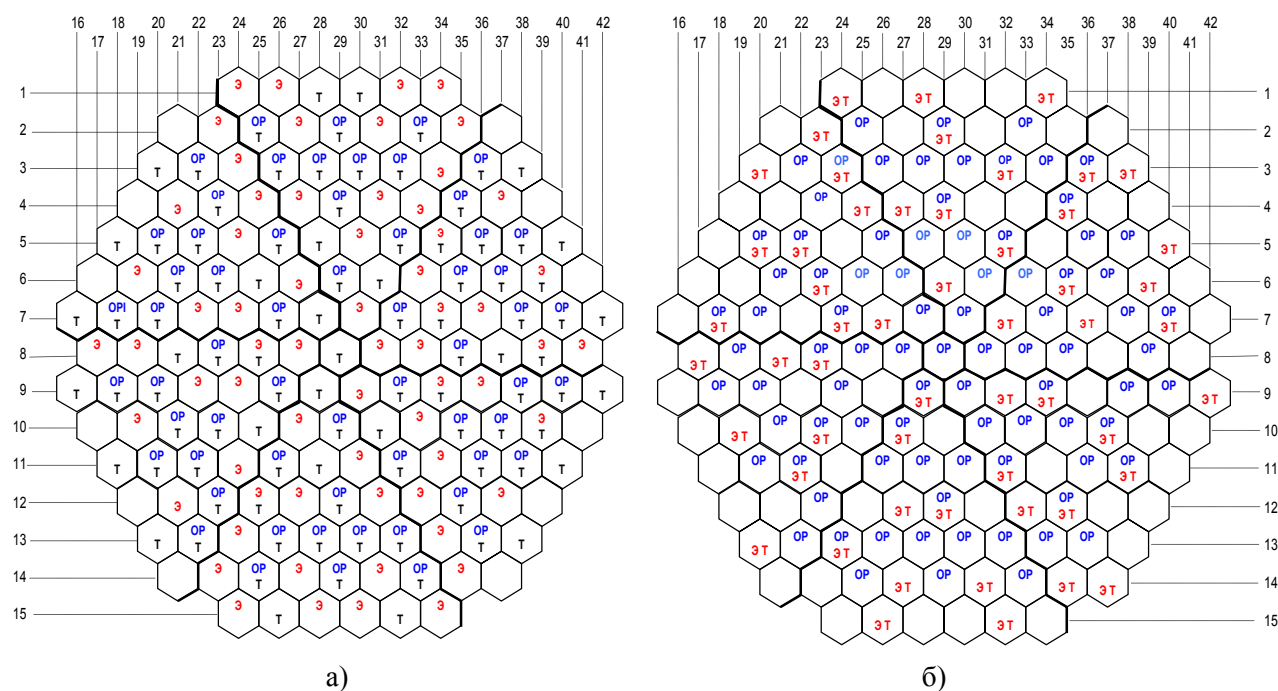


Рис.3. Расположение внутриреакторных датчиков (Э – КНИ, Т – ТП, ЭТ – СВРД) и ОР СУЗ (ОР) в активной зоне серийного реактора ВВЭР-1000 (а) и реактора ВВЭР-1000 проекта В-428 (б)

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. Картограмма активной зоны с расположением СВРД и ОР СУЗ для реактора ВВЭР-1000 (проект РУ В-428) представлена на рисунке 3. При одинаковом с серийным реактором ВВЭР-1000 общем числе ТВС количество ОР СУЗ для реактора данного проекта увеличено до 85.

Как видно, реакторы ВВЭР разных проектов могут иметь существенные отличия и особенности по составу, количеству и расположению внутриреакторных датчиков и ОР СУЗ. Следовательно, специфика разных проектов должна быть учтена при оценке возможностей оптимизации и сокращения объема испытаний по проверке соответствия координат датчиков термоконтроля 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 4 представлены распределения относительных изменений КQ 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 зоне 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 зонах 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 изменений 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.

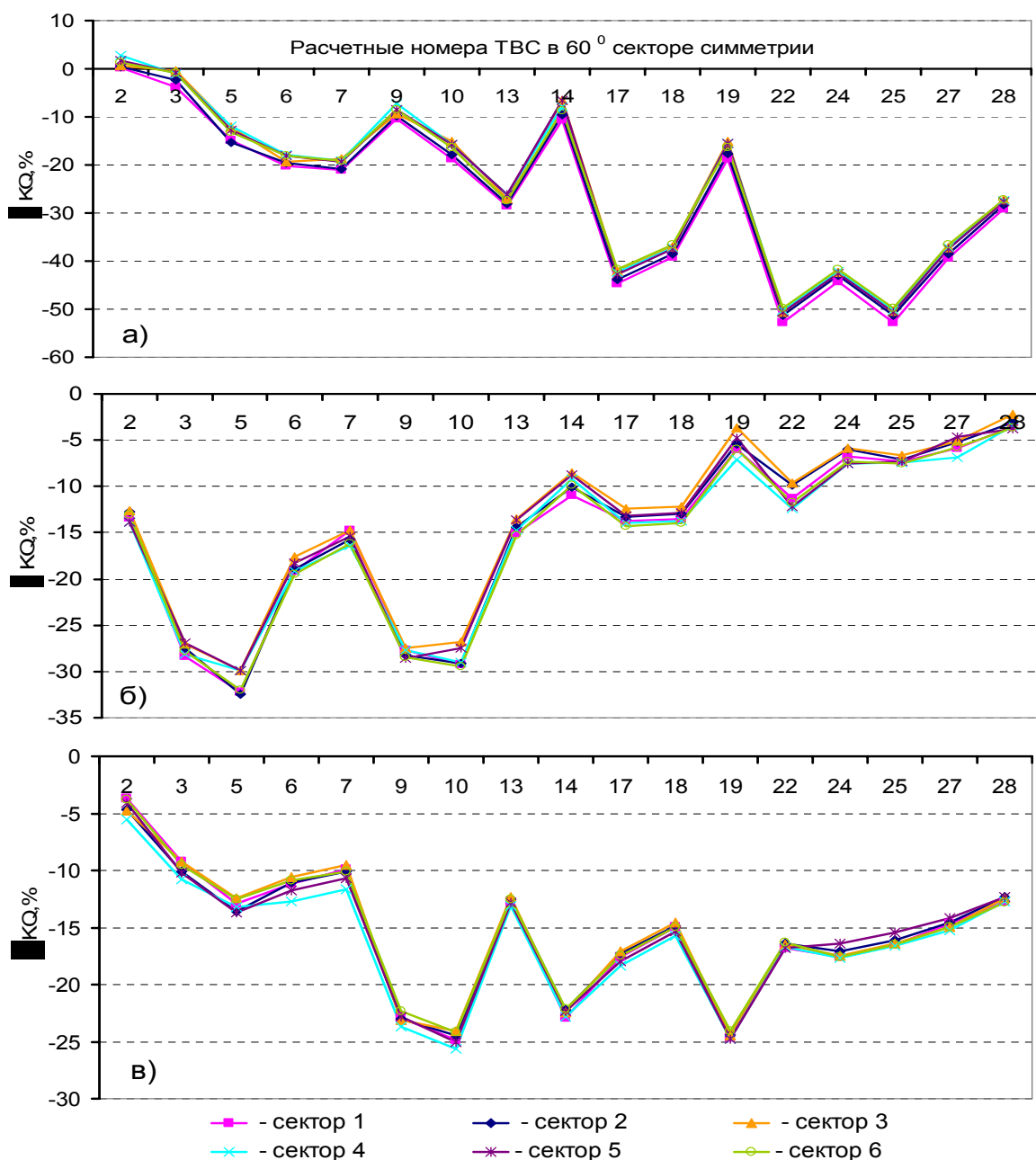


Рис.4. Распределения относительных изменений KQ в секторах симметрии при опускании ОР СУЗ 6 группы (а), 7 группы (б) и 10 группы (в). Калининская АЭС, блок №3.

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 зонах 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).

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.

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

Для энергоблоков с ВВЭР новых проектов (В-428, В-446, В-412 и проекты АЭС-2006), где используются СВРД, оптимизация заключается в сокращении числа опускае-

мых 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 зоне сектора симметрии (например, 10-я группа для проекта В-428) и шести ОР СУЗ любой группы в периферийной зоне 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 КQ, т.к. датчики температуры и энерговыделения находятся в одном канале и, следовательно, привязаны к одинаковой координате.

Для энергоблоков с серийными ВВЭР-1000, где датчики температуры и энерговыделения расположены в разных каналах, а также ввиду их большего количества, по сравнению с количеством СВРД 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 зоне сектора симметрии (например, 10-я группа), шести ОР СУЗ любой группы в периферийной зоне сектора симметрии (например, 8-я или 9-я группы) и шести ОР СУЗ группы в центральной зоне 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 на обработку. В основном, эти затраты при существующем подходе к регистрации и обработке информации при проведении испытаний связаны с переносом зарегистрированной информации со штатных систем на автономные персональные компьютеры, на которых устанавливается специализированное программное обеспечение. Таким образом, в случае изменения данного подхода возможно ещё большее сокращение временных затрат на обработку исходной информации либо за счет внедрения специализированного программного обеспечения в штатные системы в составе существующего сервисного пакета, либо за счет расширения сетевых возможностей штатных систем.

Заключение

На основании выполненного анализа результатов испытаний при вводе в эксплуатацию трех энергоблоков с ВВЭР-1000 разных проектов предложены варианты по оптимизации объемов испытаний по проверке соответствия координат датчиков термоконтроля и энерговыделения в активной зоне координатам этих датчиков в ПТК СВРК. Предложенные варианты позволят сократить чистое время только на проведение испытаний с 1.2 – 1.5 суток до 3 - 5 часов. Кроме этого, 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.