

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКТИВНУЮ ЗОНУ НА ЭТАПЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА БЛОКА №1 ТЯНЬВАНЬСКОЙ АЭС

**Ю.В. Саунин, А.Н. Добротворский, А.В. Семенихин
ФГУП "Фирма "Атомтехэнерго",
Нововоронежский филиал "Нововоронежатомтехэнерго",
г. Нововоронеж**

1 Введение

При вводе в эксплуатацию блока №1 Тяньваньской АЭС впервые на блоках с ВВЭР-1000 в состав комплексных испытаний СВРК вошли и были проведены на этапе физического пуска испытания по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону. Необходимость данных испытаний определилась в связи с включением в ППО СВРК нового поколения, поставленной на ТАЭС, алгоритма определения температуры на входе в ТВС с учетом коэффициентов влияния температур холодных ниток петель 1 контура. Данный алгоритм позволяет более точно определять температуры теплоносителя на входе в активную зону и, соответственно, более надежно выполнять одну из принципиально новых задач СВРК по формированию сигналов защиты по запасу до кризиса теплообмена. В СВРК старых поколений температура теплоносителя на входе в каждую ТВС определялась как среднее значение температуры в холодных нитках.

Обоснованные значения коэффициентов влияния могут быть получены только по результатам проведения специальных испытаний. В основу методики, предложенной в программе испытаний, легли положения, описанные в [1] и опыт проведения аналогичных испытаний на блоках с ВВЭР-440 (блоки №1, 2 АЭС "Моховце", блоки №3, 4 Нововоронежской АЭС). Особенностью блока №1 Тяньваньской АЭС являлось то, что впервые в составе СВРК были использованы 46 СВРД, в составе которых имеются ТП на входе в ТВС. Данное обстоятельство позволило после определения значений коэффициентов влияния проверить соответствие рассчитанных и измеренных значений входных температур при теплогидравлических и теплофизических испытаниях, предусмотренных этапными пусковыми программами. Таким образом, была получена оценка достоверности рассчитанных значений коэффициентов влияния на основе экспериментальных данных.

В работе приводятся описание выполненных испытаний по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону и основные результаты, полученные в ходе этих испытаний. Для обработки информации, полученной при данных испытаниях, был опробован и использован специальный комплекс прикладных программ, разработанный "Нововоронежатомтехэнерго".

2 Краткое описание методики и выполненных испытаний

Для получения экспериментальных данных, необходимых для расчёта коэффициентов влияния температур холодных ниток петель на температуры на входе в ТВС, необходимо в режимах работы РУ без значимого подогрева теплоносителя в активной зоне за счёт энергии цепной реакции деления добиться существенной разницы температур в холодных нитках петель 1 контура. В нашем случае при выполнении испытаний проводились расхолаживания 1 контура путем подрыва БРУ-А на паропроводах одного из ПГ при закрытых БЗОК на остальных ПГ. Расхолаживание через БРУ-А производили в автоматическом режиме. При этом регулятору задавался режим поддержания максимально допустимой скорости расхолаживания 30°C/час исходя из требований технологического регламента безопасной эксплуатации блока. Процесс расхолаживания прекращался (закрывали БРУ-А) тогда, когда разница температур в рас-

хлаждаемой петле и остальных устанавливалась более 1°C. Необходимая разница температур достигалась за 15-20 минут.

Не вдаваясь в детальное описание теплогидравлического процесса для такого случая можно записать, что изменение энергии теплоносителя за время расхолаживания на входе конкретной ТВС будет складываться из изменения энергии потоков теплоносителя, входящих в реактор из холодных ниток петель:

$$g_k (i_{end,k} - i_{start,k}) = \sum_{n=1}^{Ngcn} A_{nk} G_n (i_{end,n} - i_{start,n}) \quad (1)$$

где g_k и G_n - массовые расходы теплоносителя через k-ую ТВС и холодную нитку n-ой петли;

$i_{end,k}$ и $i_{start,k}$ - энтальпии теплоносителя на входе в k-ую ТВС при номинальном давлении и при температурах на входе в k-ую ТВС в начале и конце процесса расхолаживания;

$i_{end,n}$ и $i_{start,n}$ - энтальпии теплоносителя на входе в холодную нитку n-ой петли при номинальном давлении и при температурах в холодной нитке n-ой петли в начале и конце процесса расхолаживания;

A_{nk} - коэффициент, определяющий долю тепла от n-ой петли приходящую на вход k-ой ТВС;

$Ngcn$ - число работающих ГЦН.

С учётом небольших отличий температур в холодных нитках различных петель во время процесса расхолаживания (обычно не более 3 °C) в обеих частях соотношения (1) можно перейти от энтальпий к температурам. Преобразованное соотношение (1) запишется в виде:

$$\Delta T_k = \sum_{n=1}^{Ngcn} B_{nk} \Delta T_n \quad (2)$$

где ΔT_k и ΔT_n - изменение температур теплоносителя на входе в k-ую ТВС и в n-ой холодной нитке за время расхолаживания.

$$B_{nk} = \frac{A_{nk} G_n}{g_k} \quad (3)$$

Коэффициент B_{nk} определяет отношение доли тепла в единице массы теплоносителя, входящего в реактор из n-ой петли, к единице массы теплоносителя на входе в k-ую ТВС и является искомым коэффициентом влияния температуры холодной нитки петли на температуру на входе в ТВС. Таким образом, для того, чтобы найти искомые коэффициенты, необходимо провести минимум 4 расхолаживания через каждую из петель. В этом случае мы получим систему 4 уравнений с 4-мя неизвестными, которая решается любыми известными математическими методами. Из описанных рассуждений для записи соотношений (1-3) следует, что при решении системы уравнений должны выполняться следующие дополнительные условия:

$$\sum_{m=1}^4 B_{mk} = 1 \quad (4)$$

$$B_{nk} \geq 0 \quad (5)$$

Температура в холодных (горячих) петлях определялась по показаниям штатных ТС (по 4 в каждой нитке), установленных по сечению трубопровода Ду850. Проектная погрешность ТС с учетом индивидуальных градуировочных характеристик не превышает 0,5 °C. Температура на входе в 46 ТВС определялась по показаниям штатных ТП (проектное положение ТП +70 мм от низа активной зоны), размещенных в КНИТ, которые, в свою очередь, установлены в ТВС в специально предусмотренном измери-

тельном канале. Проектная погрешность для ТП с учетом индивидуальных градуировочных характеристик не превышает 1,0°C.

После нахождения коэффициентов влияния для 46 ТВС, у которых есть ТП на входе в ТВС, для остальных 117 ТВС коэффициенты влияния находятся путём экстраполяции коэффициентов, полученных по прямым измерениям. Поскольку технологическим регламентом безопасной эксплуатации блока предусмотрены режимы работы РУ с неполным количеством работающих ГЦН, то в объем испытаний были включены расхолаживания при одном отключенном ГЦН во всех комбинациях.

Представляемая методика обработки результатов испытаний отличается от используемой методики в работе [1]. В частности, в работе [1] основная система уравнений не включала определение изменения температур за время расхолаживания, а опиралась только на те температуры, которые достигались в определенный момент расхолаживания. Новый подход позволяет исключить возможные погрешности, которые определяются следующими эффектами и условиями проведения испытаний:

- дрейф и/или зависимость характеристик термодатчиков от режима работы РУ, что определяет требование по обязательной тарировке температурного контроля непосредственно перед проведением испытаний;

- неодинаковые температурные условия в петлях на начальный момент вследствие достаточно продолжительного времени, требуемого по технологическим особенностям от момента прекращения предыдущего расхолаживания до момента создания совершенно одинаковых начальных условий (см. рисунок 1);

- инерционность термодатчиков.

При выполнении обработки результатов для сравнения были применены оба подхода. Полученные результаты имели удовлетворительную сходимость.

3 Анализ полученных результатов

Значения коэффициентов влияния были получены с точностью, удовлетворяющей условию:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (T_{km}^{rec} - T_{km}^{mes})^2}{m-1}} \leq 0,05 \quad (6)$$

где T_{km}^{rec} - температура на входе в активную зону, полученная по рассчитанным коэффициентам влияния;

T_{km}^{mes} - температура на входе в активную зону, измеренная по ТП;

N – количество режимов

По полученным значениям коэффициентов влияния для режима работы РУ с полным количеством работающих ГЦН (см. рисунок 2) можно сделать следующие выводы:

- максимальное влияние на температуру на входе ТВС оказывает температура в ближней петле, которая охватывает свой сектор в активной зоне;

- наблюдается смещение потоков теплоносителя на входе в активную зону против часовой стрелки относительно направления входа потоков теплоносителя в реактор, которое больше при большем угле между смежными петлями в сторону смещения (петля 1 и петля 3);

По полученным значениям коэффициентов влияния для режимов работы РУ с 3-мя работающими ГЦН (см. рисунки 3-6) можно сделать следующие выводы:

- максимальное влияние на температуру на входе ТВС может оказывать не только температура в ближней петле, но и температура других петель, что зависит от взаимного положения этой петли и петли с отключенным ГЦН;

– характер смещения потоков теплоносителя на входе в активную зону относительно направления входа потоков теплоносителя в реактор зависит от взаимного положения петель с работающими ГЦН и петли с отключенным ГЦН, вплоть до смещения в соседний сектор для смежных петель (с работающим и отключенным ГЦН) с большим углом между ними.

По полученным значениям коэффициентов влияния для всех режимов можно отметить следующее:

- ни для одной ТВС не был получен коэффициент, равный единице;
- максимальные коэффициенты, относящиеся к разным петлям, составляют для режима работы с полным количеством петель 0,94-0,95, а для режимов работы с тремя ГЦН, соответственно, 0,85 – 0,97;
- значения коэффициентов для ТВС, расположенных далеко от места входа потоков невелики и уменьшаются до нуля с увеличением расстояния.

Это указывает на то, что на температуру теплоносителя на входе в ТВС оказывают влияние все петли, а степень влияния определяется режимом работы РУ и расположением ТВС по отношению к той или иной петле. Таким образом, можно подчеркнуть, что определение температуры на входе в активную зону как среднее значение температур холодных ниток, действительно, имеет методическую погрешность, которая будет тем больше, чем больше разница температур между холодными нитками.

Следует отметить, что наиболее сложной задачей при определении коэффициентов влияния является корректная интерполяция результатов для ТВС с прямыми измерениями на ТВС, в которых нет прямых измерений температуры. В нашем случае был применен метод, который учитывает с определенным весом не только соседние ТП, но и ТП, находящиеся во 2-ом окружении от данной ТВС. Были использованы следующие веса: 0,8 – для соседних ТП и 0,05 – для ТП из 2-ого окружения.

Особенностью СВРК для Тяньваньской АЭС являлось то, что в данном проекте впервые для АЭС с ВВЭР-1000 для температурного контроля теплоносителя в активной зоне применены СВРД типа КНИТ, которые включают помимо ТП на входе в ТВС (условное наименование ТП-3), ещё 2 ТП на выходе из ТВС (условное наименование ТП-1А и ТП-1Б). Поэтому представлялось интересным получить значения коэффициентов влияния и по показаниям ТП-1А и ТП-Б. Как оказалось, различия в значениях очень малы, независимо от того, показания каких ТП брать (ТП-3, ТП-1А, ТП-1Б). Из этого следует, что в активной зоне отсутствует заметное межкассетное перемешивание, либо поток теплоносителя, попавший в канал СВРД на входе, не имеет заметного подмешивания от других потоков по высоте канала.

Кроме этого, представлялось интересным, учитывая значения температур в горячих нитках петель, при проведении данных испытаний определить перемешивание петлевых потоков на всем внутрикорпусном тракте (от холодных до горячих ниток). Следует отметить, что программой ввода блока в эксплуатацию предусматриваются специальные испытания по определению перемешивания петлевых потоков. В таблице представлены значения коэффициентов перемешивания, полученные по результатам испытаний по определению температурного поля на входе в активную зону и по результатам испытаний по определению перемешивания петлевых потоков. Как видно из таблицы, наблюдается хорошая сходимости в полученных результатах.

Методика испытаний по перемешиванию петлевых потоков имеет следующие технологические особенности:

- испытания проводятся на этапе энергетического пуска на подэтапе освоения уровня мощности 10-12% $N_{ном}$;
- разница в температурах теплоносителя в петлях 1 контура достигается путём отсечения одного из ПГ по пару и питательной воде;
- для восстановления исходных условий (выравнивание давлений в ПГ и ГПК) предусматривается отключение ГЦН.

Коэффициенты перемешивания петлевых потоков, определенные по результатам двух видов испытаний

Испытания по перемешиванию петлевых потоков				Испытания по определению температурного поля			
К1	К2	К3	К4	К1	К2	К3	К4
0,65	0,06	-	0,29	0,65	0,05	0,01	0,29
0,30	0,65	0,05	-	0,28	0,66	0,04	0,02
-	-	-	-	0,01	0,29	0,66	0,04
-	-	-	-	0,06	0,00	0,29	0,65

Вследствие этих особенностей методика испытаний по перемешиванию петлевых потоков является более трудоёмкой и связана с большим числом ограничений по условиям безопасной эксплуатации блока, что подтверждает и практический опыт выполнения этих испытаний. Учитывая хорошую сходимость полученных результатов, можно считать нецелесообразным проведение испытаний по определению перемешивания межпетлевых потоков на этапе энергетического пуска, если на этапе физического пуска проводятся испытания по определению температурного поля на входе в активную зону. Данный вывод должен быть принят во внимание для оптимизации объёмов работ и количества испытаний при вводе в эксплуатацию новых блоков с ВВЭР.

4 Заключение

Выполненные на блоке №1 Тяньваньской АЭС впервые на энергоблоках с ВВЭР-1000 испытания по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону на этапе физического пуска показали свою необходимость для определения экспериментально обоснованных данных для БД СВРК. Кроме этого, данные испытания позволили получить дополнительную информацию для оценок теплогидравлических характеристик РУ.

Применение в алгоритмах СВРК для определения температуры теплоносителя на входе в ТВС коэффициентов влияния температур теплоносителя в холодных нитках даёт более представительную информацию даже для ТВС с ТП на входе. Как показал в дальнейшем анализ информации в режимах работы РУ "на мощности" показания ТП на входе в ТВС из-за особенностей расположения не могут браться в расчёты без дополнительной обработки и корректировки.

Испытания по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону включены и будут выполнены при вводе в эксплуатацию блока №2 Тяньваньской АЭС. При подтверждении результатов испытаний на блоке №1 и на блоке №2 можно будет говорить о том, что данные испытания следует проводить только на головных блоках, что приведет к сокращению времени ввода в эксплуатацию серийных блоков. В частности, уже сейчас, ввиду ограничения количества циклов нагружений ГЦН и редко используемых при промышленной эксплуатации режимов работы с неполным числом работающих ГЦН, для блока №2 предложено ограничить данные испытания только режимом со всеми работающими ГЦН.

Кроме того, с целью сокращения времени и затрат на ввод блока в эксплуатацию предлагается исключить испытания по перемешиванию петлевых потоков на последующих блоках с ВВЭР при условии проведения испытаний по определению температурного поля.

Список литературы

1. С.А Цимбалов, А.В. Крайко. Температурное поле в теплоносителе на входе в активную зону ВВЭР-440. Атомная энергия, т.52, вып.5, май 1982.

Перечень принятых сокращений

АЭС	- атомная электрическая станция
БД	- база данных
БЗОК	- быстродействующий запорно-отсечной клапан
БРУ-А	- быстродействующая редукиционная установка сброса пара в атмосфе- ру
ВВЭР	- водо-водяной энергетический реактор
ГЦН	- главный циркуляционный насос
КНИТ	- канал нейтронных и температурных измерений
ПНР	- пуско-наладочные работы
ПГ	- парогенератор
ППО	- прикладное программное обеспечение
РУ	- реакторная установка
СВРД	- сборка внутриреакторных детекторов
СВРК	- система внутриреакторного контроля
ТАЭС	- Тяньваньская АЭС
ТС	- термометр сопротивления
ТП	- термопара
ТВС	- тепловыделяющая сборка