

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В АКТИВНУЮ ЗОНУ ПРИ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС С ВВЭР

Ю.В. Саунин, А.Н. Добротворский, А.В. Семенихин
ОАО «Атомтехэнерго» Нововоронежский филиал «Нововоронежатомтехэнерго»
г. Нововоронеж, Россия, 2011г.

Для недопущения аварий и аварийных ситуаций из-за прекращения или уменьшения теплоотвода от активной зоны важное значение имеет оперативный контроль запаса до кризиса теплоотдачи. Одним из определяющих параметров для расчета ЗКТ является энтальпия теплоносителя на входе в активную зону, поступающего из холодных ниток ГЦТ, которая зависит от температуры и давления. При этом зависимость от температуры более существенна в условиях поддержания регламентируемых эксплуатационных режимов. На АЭС с ВВЭР-1000 прямые измерения температуры на входе в активную зону либо не предусматриваются (проекты В-187, В-302, В-338 и В-320), либо их количество в составе СВРД типа КНИТ недостаточно (проекты В-428, В-446). К тому же конструктивные особенности, как показал первый практический опыт, приводят к низкой представительности таких измерительных каналов контроля [1, 2]. Поскольку вследствие возможного неравномерного энерговыделения в активной зоне (например, упавший или застрявший ОР СУЗ), либо неравномерного теплоотвода от ПГ могут возникать существенные температурные перепады по холодным ниткам ГЦТ, то определение возникающего температурного поля на входе в активную зону расчетным путем представляется важной задачей.

Оперативный контроль ЗКТ, а также подогревов в ТВС осуществляется в системе внутрореакторного контроля. В СВРК старых модификаций температура на входе во все 163 ТВС определяется как средняя температура холодных ниток ГЦТ, которая используется далее для восстановления поля энерговыделения, расчета подогревов, ЗКТ и т.д. Такое допущение, как показывают опытные данные, может приводить к методической погрешности температуры до 2,5 °С на входе в ТВС, например, для режима работы РУ с 3-мя ГЦН даже в первую топливную кампанию со «свежими» ПГ.

При реализации в СВРК новых модификаций контроля за ЗКТ с выдачей инициирующих сигналов в СГИУ, а также для снижения погрешности расчета ЗКТ, в программном обеспечении СВРК стал применяться усовершенствованный алгоритм расчета температуры на входе в ТВС с взвешенным усреднением температуры в холодных нитках ГЦТ. Для определения весов температуры холодных ниток ГЦТ (далее коэффициентов влияния) для каждой ТВС выявилась необходимость в проведении специальных испытаний, которые и получили название «испытания по определению температурного поля на входе в активную зону». Методология эти испытаний сводится к достижению в одной петле температуры с существенной разницей (до 2 – 3 °С) от температур других петель.

Кроме этого, как показал первый опыт их проведения на АЭС с ВВЭР-1000 [8], такие испытания могут служить и для подтверждения межпетлевого перемешивания потоков теплоносителя в корпусе реактора. Проведение этих испытаний на более ранних этапах ввода в эксплуатацию (ХГО или физический пуск) позволяет отказаться от более трудоемких отдельных испытаний по определению перемешивания петлевых потоков на этапе энергетического пуска, а также для обоснования безопасности в реактивных авариях, связанных с изменениями температуры теплоносителя или концентрации борной кислоты.

За период внедрения в СВРК усовершенствованного алгоритма расчета температур на входе в активную зону авторами, начиная с 2005 года по настоящее время, выполнены испытания на 4-х вводимых в эксплуатацию энергоблоках с ВВЭР-1000 разных проектов. Результаты и сравнительный анализ данных, полученных на энергоблоках №1, 2 АЭС «Тяньвань» приведены в работах [7, 8]. В данном докладе представляются первые результаты, анализ и применение результатов полученных на энергоблоке №2 Ростовской АЭС проекта В-

320 и их сравнение с результатами, полученными на других энергоблоках, включая энергоблок №1 АЭС «Бушер» проекта В-446.

Методика проведения испытаний. Методика проведения испытаний, примененная на АЭС «Тяньвань» [7, 8] и на АЭС «Бушер», основывалась на создании температурного перекося в холодных нитках за счет сброса пара из одного ПГ в атмосферу через БРУ-А при отсеченных по пару остальных ПГ.

На энергоблоке №2 Ростовской АЭС методика и объем проведенных испытаний по рекомендациям оперативного персонала были изменены, что определилось спецификой серийного проекта В-320 и состояния технологического оборудования, в частности:

а) перед регуляторами БРУ-А на проектах В-320 не предусмотрены отсечные клапаны как на проектах В-428 и В-446;

б) БЗОК являются отдельными задвижками, а не целым паровым блоком как на В-428 и к ним предъявляются требования по ревизии при определенном количестве посадок;

в) на байпасах БЗОК установлена ручная арматура, обслуживание которой при рабочих параметрах представляет определенные трудности;

г) на входе в ТВС не предусмотрено прямое измерение температуры с помощью термопреобразователей, т.к. используются сборки СВРД типа КНИ, а измерение температуры теплоносителя проводится только на выходе из ТВС, с помощью ТП, которые устанавливаются в сухих направляющих каналах БЗТ;

Исходя из вышеуказанного, а также из-за экономических соображений (сокращение безвозвратных потерь пара и, соответственно, химобессоленной воды), было решено выполнить испытания путем захолаживания выбранной петли за счет увеличения подачи питательной воды в ПГ по следующей схеме:

1) Закрыть 3 из 4-х БЗОК, один паропровод оставить связанным с ГПК, чтобы исключить долгие операции по выравниванию давлений до и после БЗОК, а также снизить количество трудоемких и длительных переключений на ручной арматуре;

2) Для начала захолаживания требуемой петли регулятор уровня в ПГ этой петли поставить в положение «снять с автомата», открыть подачу питательной воды от ВПЭН расходом 80-150 т/ч в зависимости от числа работающих ГЦН, а подачу питательной воды на остальные ПГ прекратить;

3) Для уменьшения скорости роста уровня в ПГ максимально открыть продувку ПГ требуемой петли, а продувку остальных ПГ максимально уменьшить.

На подэтапе ХГО дополнительно к предыдущим режимам при аналогичных испытаниях на других энергоблоках было впервые выполнено определение температурного поля на входе в активную зону для режимов работы РУ с 2-мя ГЦН во всех комбинациях. Также, для подтверждения представительности результатов испытаний, полученных на подэтапе ХГО, испытания в основном эксплуатационном режиме работы РУ с 4-мя ГЦН на этапе ФП были повторены.

Иллюстрацией работоспособности и правильности выбранной методик проведения испытаний служат рисунки 1 и 2. На рисунке 1 приведен график изменения температуры холодных ниток и уровня в ПГ. На рисунке 2 представлены графики изменения давления пара в ПГ, а также давления и температуры питательной воды. Оба рисунка представляют изменения параметров в процессе поочередного расхолаживания петель при работе РУ с 4-мя ГЦН.

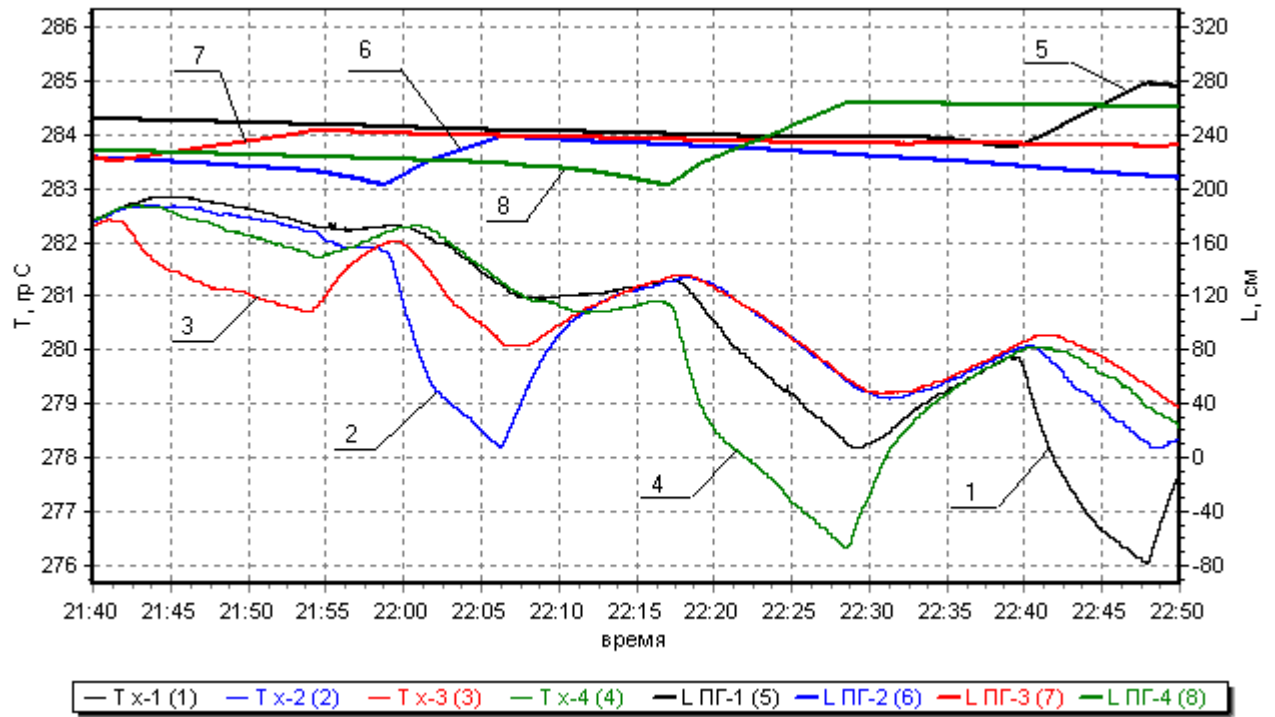


Рисунок 1. Изменение температуры холодных ниток и уровня в ПГ при последовательном расхолаживании петель в режиме работы РУ с 4-мя ГЦН. Энергоблок №2 Ростовской АЭС

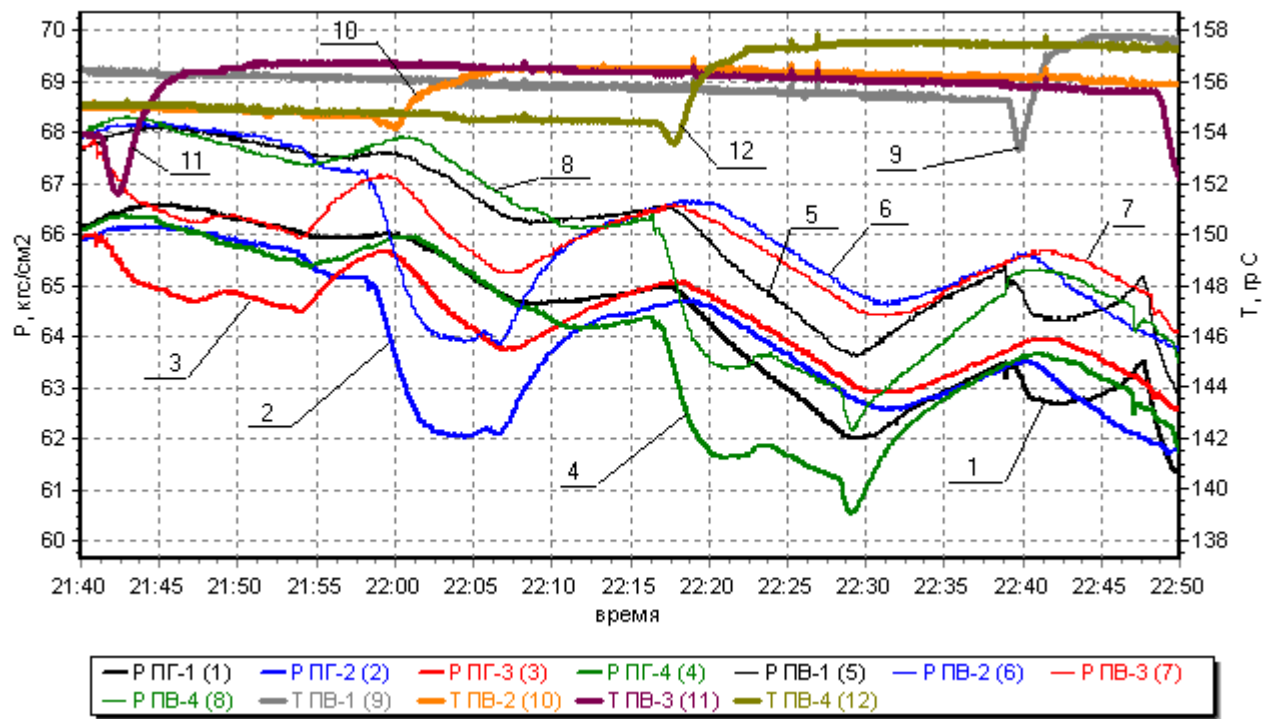


Рисунок 2. Изменение давление пара в ПГ, давления и температуры питательной воды при последовательном расхолаживании петель в режиме работы РУ с 4-мя ГЦН. Энергоблок №2 Ростовской АЭС

По рисунку 1 видно, что через 2 минуты после начала расхолаживания появляется перегиб в изменении температуры расхолаживаемой петли, который зависит от прекращения снижения давления пара в ПГ (см. рисунок 2). Наиболее вероятное объяснение данного явления – это работа регулятора давления в деаэраторе машзала (см. поведение давления и температуры

питательной воды на рисунке 2). Также хорошо видно, что скорость изменения температуры холодных ниток зависит от расхода подачи питательной воды от ВПЭН. Именно поэтому при расхолаживании петли 3 была меньшая глубина изменения температуры в холодной нитке петли 3 или недостаточный расход питательной воды. Поскольку это было при первом расхолаживании, то, можно сказать, что проходило опробование новой методики с необходимым консерватизмом. При этом стоит отметить, что даже такая небольшая разница температуры расхолаживаемой петли от остальных ($\sim 1^\circ\text{C}$) оказалась в конечном итоге достаточной для расчета искомых коэффициентов влияния.

Результаты испытаний. На рисунке 3 приведены результаты испытаний в режиме работы РУ с 4-мя ГЦН на этапах ХГО и ФП энергоблока №2 Ростовской АЭС. На этом и рисунке и далее: красный цвет – расхолаживаемая петля с работающим ГЦН, синий цвет – петля с работающим ГЦН, серый цвет – петля с неработающим ГЦН. Как видно из рисунка наблюдается приемлемое совпадение показанных распределений (точность определения коэффициентов влияния 0,1). Следовательно, ввиду большого общего объема данных испытаний (4 расхолаживания для режима работы с 4-мя ГЦН, 12 расхолаживаний для режимов работы с 3-мя ГЦН и 12 расхолаживаний для режимов работы с 2-мя ГЦН) и для сокращения временных затрат, испытания для одного характерного режима работы РУ достаточно проводить только на одном этапе.

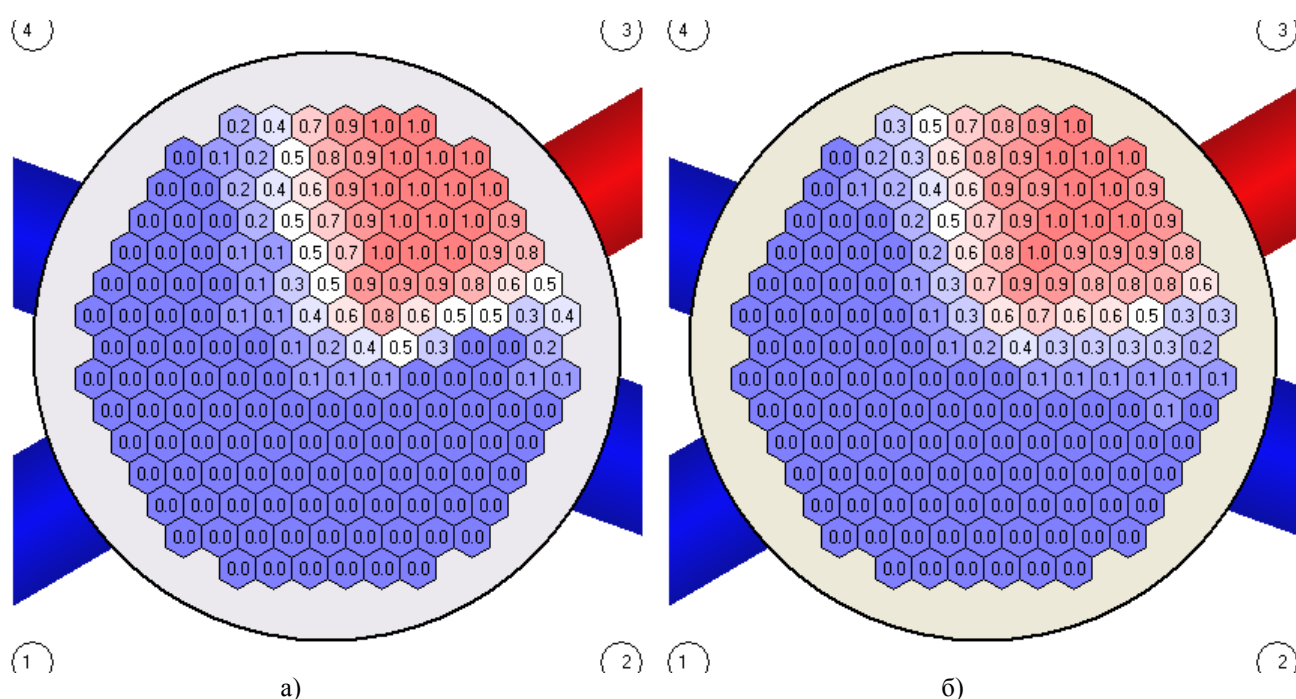


Рисунок 3. Температурные поля на входе в активную зону (распределения коэффициентов влияния) в режиме работы РУ с 4-мя ГЦН на этапе ХГО (а) и на этапе физпуска (б). Энергоблок №2 Ростовской АЭС

Отмеченной с первых испытаний характерной особенностью реакторов ВВЭР-1000 является наличие смещения потока теплоносителя на входе в активную зону против часовой стрелки относительно расхолаживаемой петли. На рисунке 4 для сравнения приведены результаты испытаний в режиме работы РУ с 4-мя ГЦН на энергоблоках №1 АЭС «Тяньвань», №2 Ростовской АЭС и №1 АЭС «Бушер». По данному рисунку видно, что поворот потока против часовой стрелки на АЭС «Тяньвань» больше приблизительно на угол 15-20 градусов, это приводит к лучшему межпетлевому перемешиванию в проекте В-428 относительно проекта В-320 и В-449. Картины по РоАЭС и АЭС «Бушер» практически идентичны, за исключением немного более заметной размытости эпицентра для РУ В-449

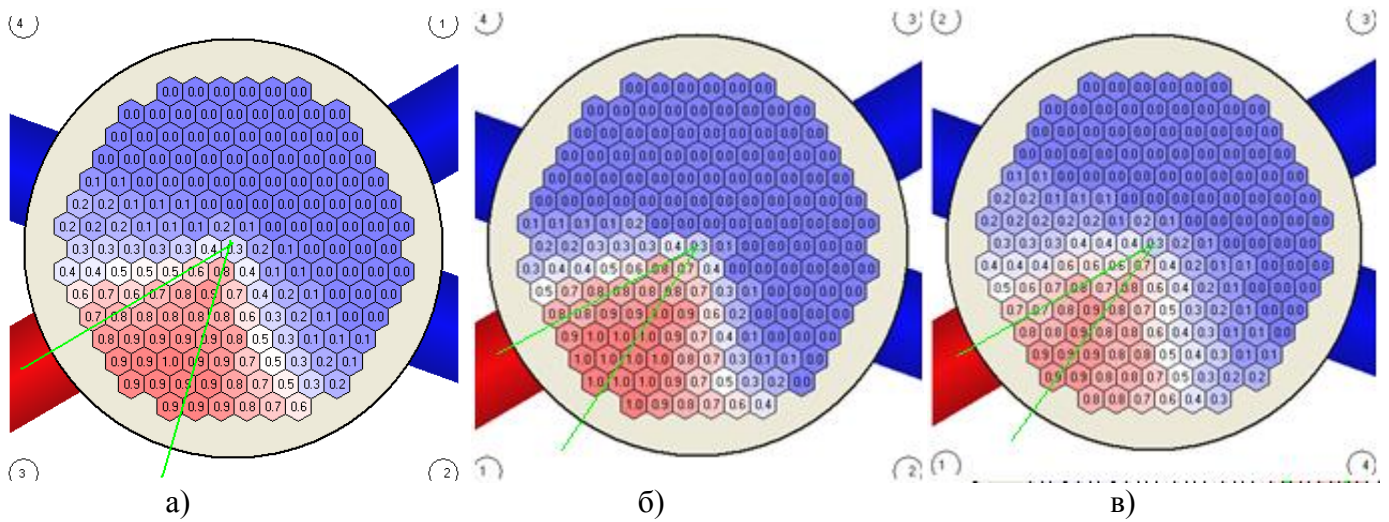


Рисунок 4. Температурные поля на входе в активную зону (распределения коэффициентов влияния) для энергоблоков №1 ТАЭС (а), №2 PoAЭС (б), №1 АЭС «Бушер» (в) для режима работы с 4-мя ГЦН.

При определении температурного поля на входе в активную зону для режимов работы РУ с 2-мя ГЦН (см. рисунок 5) отмечено возникающее разделение поля на 2 области со следующими особенностями:

- в режимах с ГЦН, работающими на противоположных петлях (1, 3 и 2, 4), и в режимах с ГЦН, работающими на смежных петлях с большим углом между ними (1, 2 и 3, 4), поле делится таким образом, что влияние выделенной петли распространяется на свою область и область смежной петли по малому углу (5а, 5в);
- в режимах с ГЦН, работающими на смежных петлях с малым углом между ними (1, 4 и 2, 3) поле делится таким образом, что влияние выделенной петли распространяется на свою область и область смежной петли против хода часовой стрелки, а другая петля с работающим ГЦН влияет на область отключенных петель (5б);
- за исключением узкой полосы по границе разделения потоков, теплоноситель из работающих петель практически не смешивается.

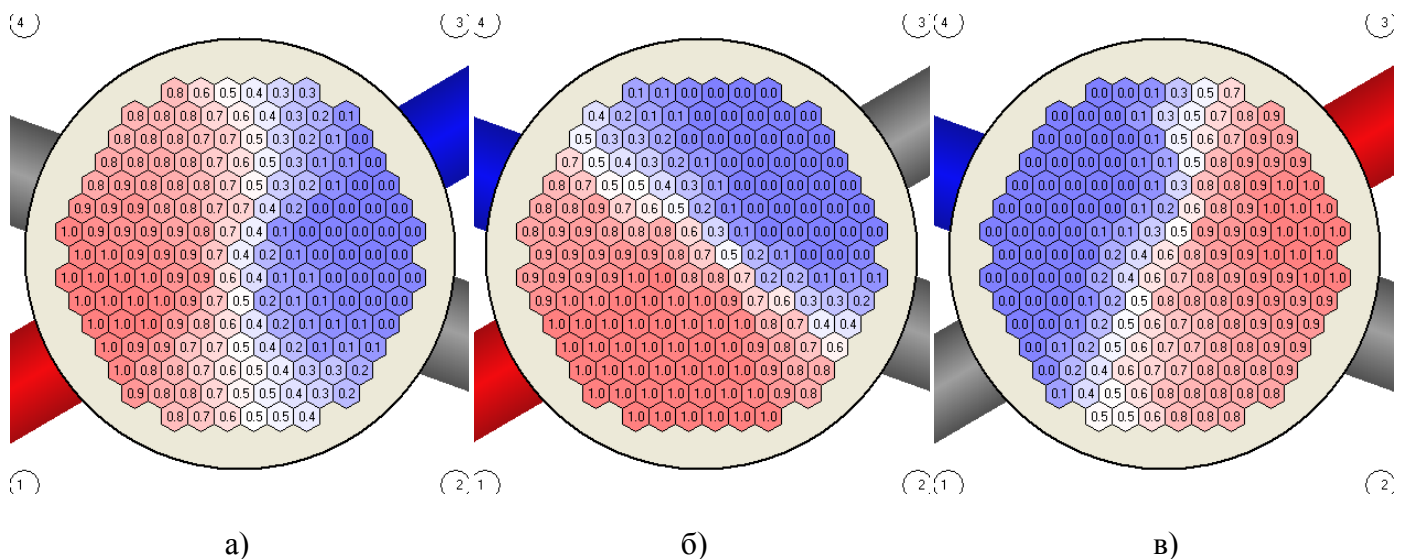


Рисунок 5. Температурные поля на входе в активную зону (распределения коэффициентов влияния) в режимах работы с 2-мя ГЦН (а – в работе ГЦН на противоположных петлях, б – в работе ГЦН на смежных петлях с малым углом между ними, в - в работе ГЦН на смежных петлях с большим углом между ними). Энергоблок №2 Ростовской АЭС

На рисунках 6-9 показаны распределения коэффициентов влияния при всех режимах работы РУ с 3-мя ГЦН на энергоблоке №1 АЭС «Тяньвань», энергоблоке №2 Ростовской АЭС и энергоблоке №1 АЭС «Бушер». По рисункам 6 и 8 можно отметить, что наблюдается совпадение областей влияния петель в режимах с отключенными ГЦН-2 и ГЦН-4 (в нумерации петель для РоАЭС) с поправкой на то, что для ТАЭС характерно более широкое пятно с эпицентром. Эта особенность, возможно, связана со способом расчета коэффициентов в ТВС без ТП, а именно, учетом значений во втором радиусе вокруг искомой ТВС. Для АЭС «Бушер» в этих случаях заметно более сильное влияние отключенных петель, т.е. теплоноситель выходит в области активной зоны рядом с отключенной петлей.

Особый интерес представляет то, что для режимов с отключенными ГЦН-1 и ГЦН-3 (см. рис. 7 и 9) совпадения характера распределений не наблюдается. Как видно, если на РоАЭС отклик идет в сторону отключенной петли, то для ТАЭС отклик идет против часовой стрелки. В случае с АЭС «Бушер» ситуация двойка: в первом случае, поведение аналогично тому, что зафиксировано на ТАЭС, а во втором – тому, что зафиксировано на РоАЭС. Чтобы определить причину такого расхождения (связано ли это с характеристиками ГЦН, с наличием перемешивания теплоносителя на тракте от входа до выхода из активной зоны, гидравликой опускного тракта и т.п.) необходимо накопление еще большего количества опытных данных по исследованию температурных полей для режима работы РУ с 3-мя ГЦН.

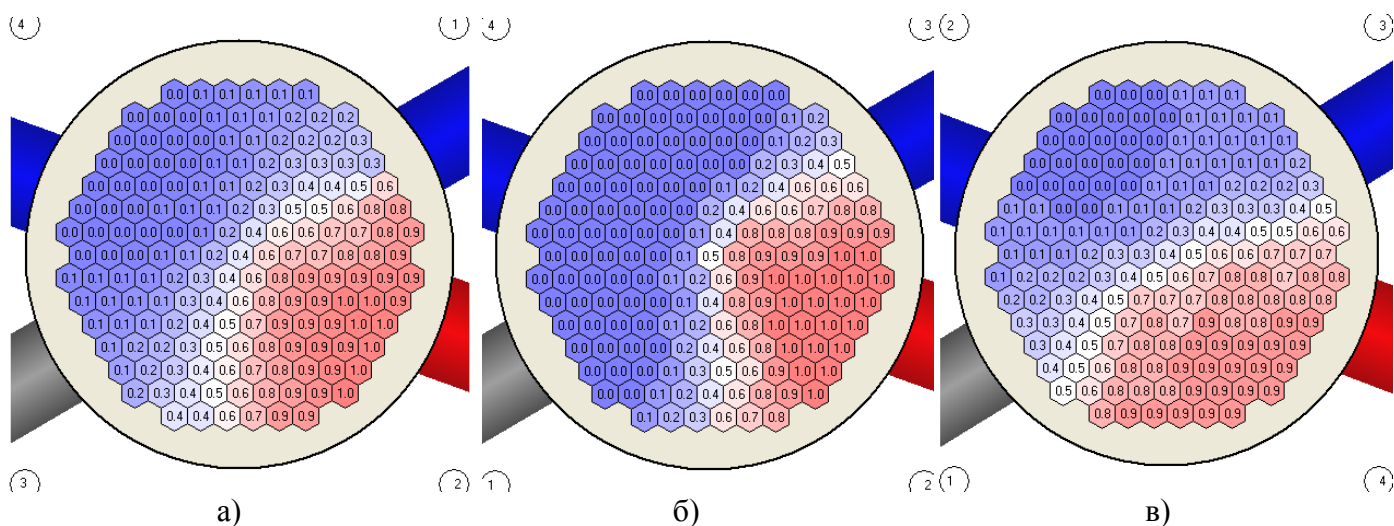


Рисунок 6. Температурные поля на входе в активную зону (распределения коэффициентов влияния) в режиме работы РУ с ГЦН-1, 2, 4 (в нумерации РоАЭС). Энергоблок №1 ТАЭС (а), Энергоблок №2 РоАЭС (б) и энергоблок №1 АЭС «Бушер» (в)

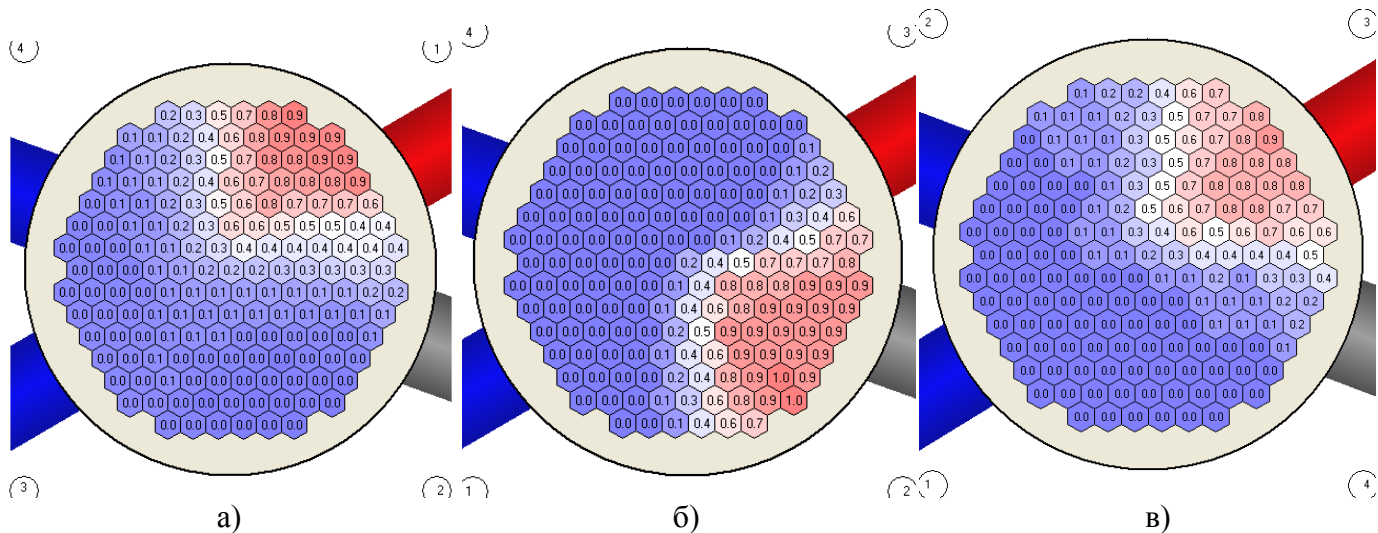


Рисунок 7. Температурные поля на входе в активную зону (распределения коэффициентов влияния) в режиме работы РУ с ГЦН-1, 3, 4 (в нумерации РоАЭС). Энергоблок №1 ТАЭС (а), Энергоблок №2 РоАЭС (б) и энергоблок №1 АЭС «Бушер» (в)

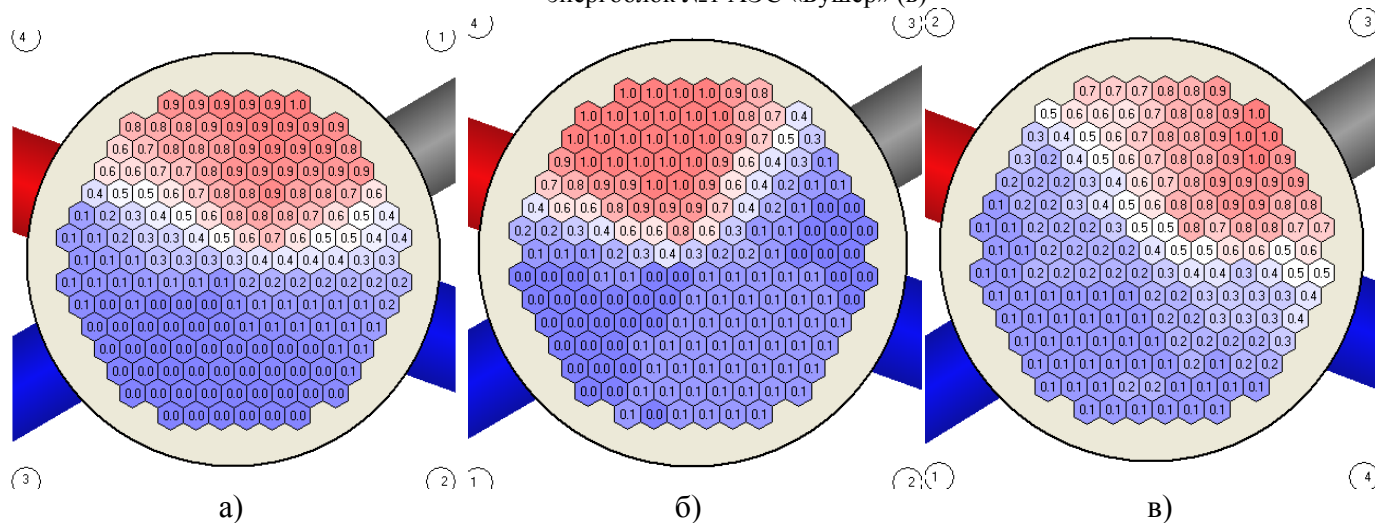


Рисунок 8. Температурные поля на входе в активную зону (распределения коэффициентов влияния) в режиме работы РУ с ГЦН-2, 3, 4 (в нумерации РоАЭС). Энергоблок №1 ТАЭС (а), Энергоблок №2 РоАЭС (б) и энергоблок №1 АЭС «Бушер» (в)

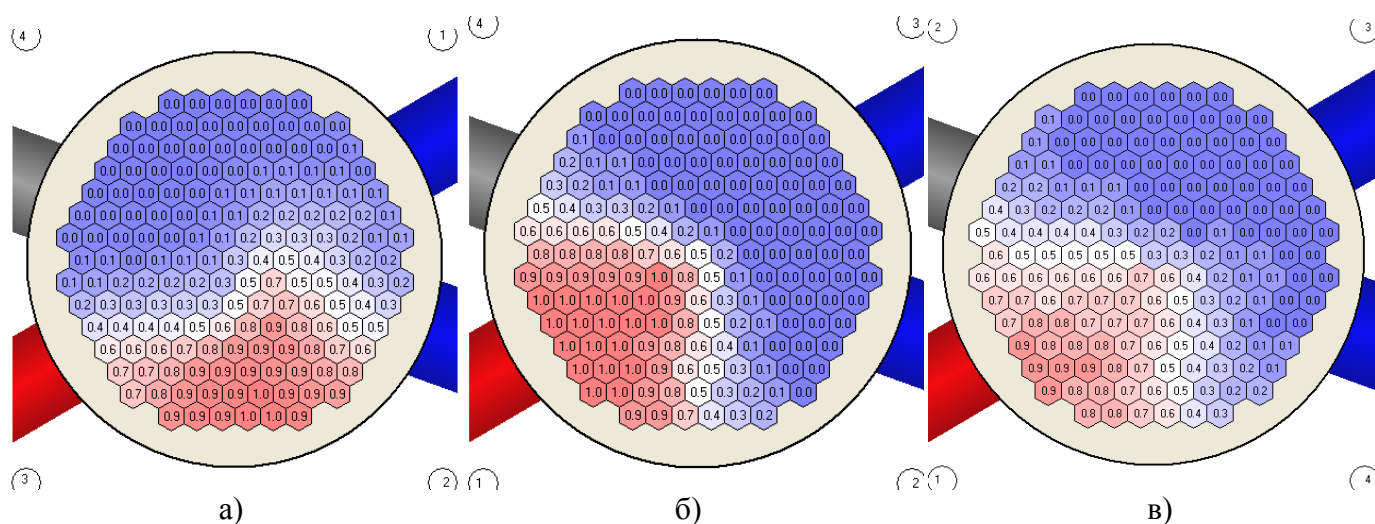


Рисунок 9. Температурные поля на входе в активную зону (распределения коэффициентов влияния) в режиме работы РУ с ГЦН-1, 2, 3 (в нумерации РоАЭС). Энергоблок №1 ТАЭС (а), Энергоблок №2 РоАЭС (б) и энергоблок №1 АЭС «Бушер» (в)

Применение результатов испытаний. На рисунке 10 приведено температурное поле (учтены коэффициенты влияния) на входе в активную зону, которое образуется при опускании ОР СУЗ 05-22 до положения 20 % от низа активной зоны при проведении испытания СВРК по проверке соответствия координат датчиков ТК и ЭВ. Из рисунка видно, что разброс температур в петлях находится в пределах 1,2 °С для мощности 40 % $N_{ном}$, т.е. при падении ОР СУЗ на номинальной мощности разброс может достигать 3,0 °С. При этом очевидно, что область с максимальной температурой на входе ТВС также будет иметь и максимальное энерговыделение из-за упавшего ОР в противоположном секторе активной зоне, что уменьшает ЗКТ. Таким образом, без учета коэффициентов влияния (если остается расчет температуры на входе в ТВС путем усреднения температур холодных ниток) существенно увеличивается погрешность расчета ЗКТ в неконсервативную сторону по безопасности в противоположной стороне активной зоны от места опускания (падения) ОР СУЗ.

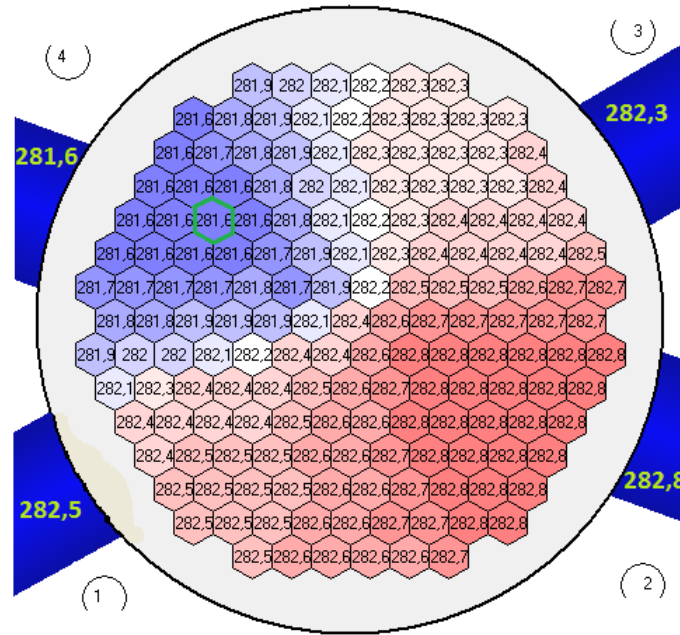


Рисунок 10. Температурное поле на входе в активную зону при опускании ОР СУЗ 05-22 на уровне мощности 40 % Nном в режиме работы РУ с 4-мя ГЦН. Энергоблок №2 РоАЭС

На рисунке 11 приведены температурные поля (учтены коэффициенты влияния) на входе в активную зону, которые образуются в режиме работы РУ с 2-мя и 3-мя ГЦН. Как видно из рисунков, режим работы на 2-х ГЦН не создает критических перекосов по температуре в холодных нитках ГЦТ (отклонение менее 0,5 °С), что соблюдается как для смежных, так и для противоположных петель. Таким образом, применение коэффициентов влияния для режимов работы РУ с 2-мя ГЦН можно считать необязательным и, целесообразно, в дальнейшем, при ПНР проводить аналогичные испытания для таких режимов возможно только для головных энергоблоков. Наоборот, для режимов работы РУ с 3-мя ГЦН возникает отклонение температуры в холодных нитках не менее 3 °С. Исходя из этого, по мнению авторов, испытания для данного режима рекомендуется проводить обязательно при вводе в эксплуатацию любого блока, а также и при замене выемных частей ГЦН в ходе промышленной эксплуатации.

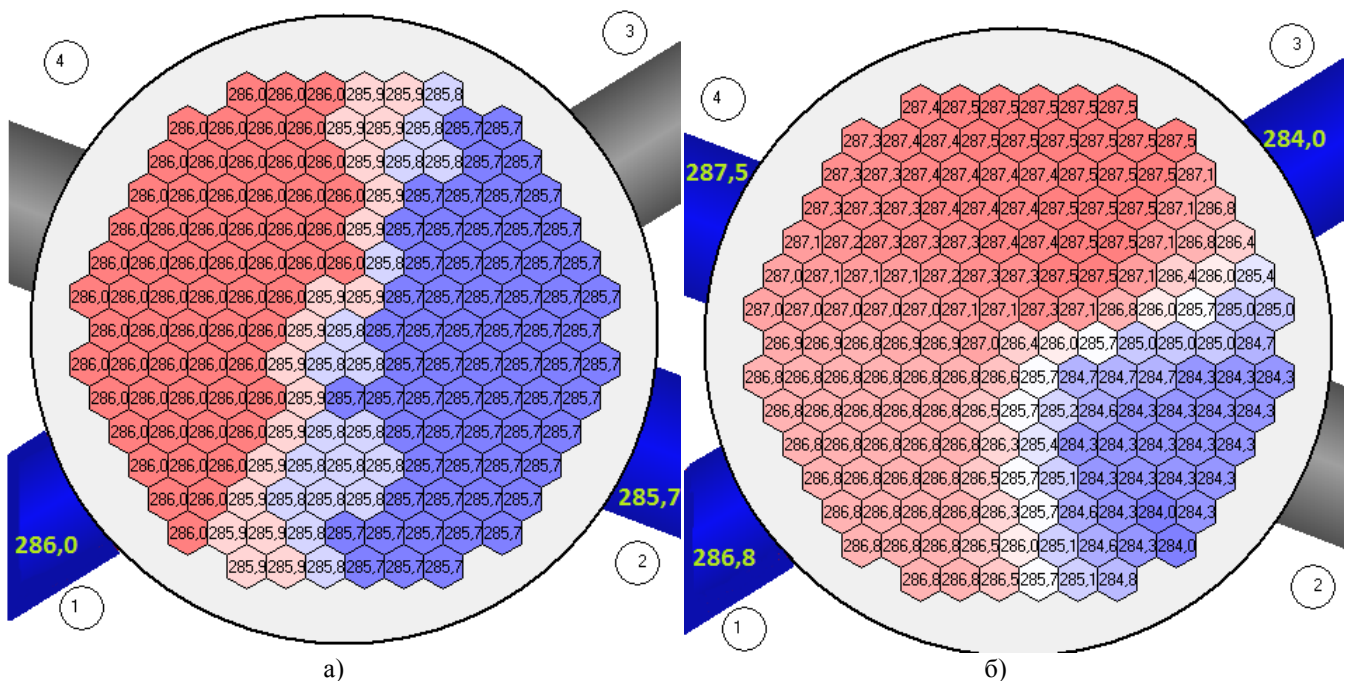


Рисунок 11. Температурное поле на входе в активную зону в режиме работы РУ с 2-мя (а) и 3-мя (б) ГЦН. Энергоблок №2 РоАЭС.

В качестве наглядного примера, на рисунке 12 показаны отклонения в подогревах на ТВС по данным СВРК без применения коэффициентов влияния и с применением коэффициентов влияния при «ручном» расчете в режиме работы РУ с 3-мя ГЦН. Видно, что в секторе с отключенным ГЦН-2 подогрев на ТВС вычисляется в СВРК с недогревом в 2°C. В результате этого получается, что сектор с отключенным ГЦН-2 имеет минимальную нагрузку при минимальных расходах теплоносителя через ТВС, что приводит к завышенным значениям ЗКТ в секторе 2.

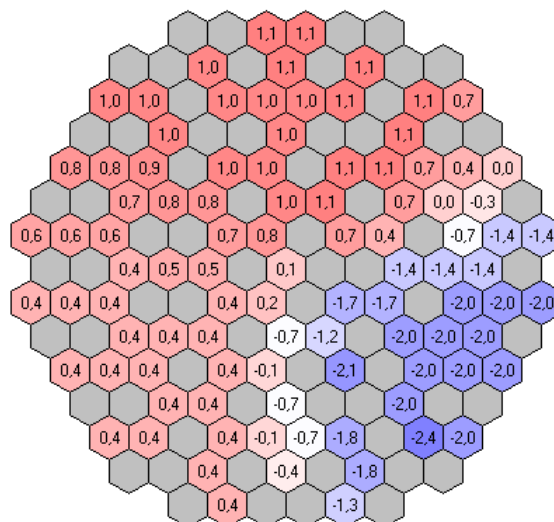


Рисунок 12. Отклонения подогревов в ТВС без применения коэффициентов влияния и с применением коэффициентов влияния в режиме работы с 3-мя ГЦН. Энергоблок №2 РоАЭС

Заключение. По представленным результатам анализа полученных коэффициентов влияния и температурных полей теплоносителя 1-го контура на входе в активную зону энергоблока №2 Ростовской АЭС можно сделать следующие выводы:

- коэффициенты влияния необходимо использовать для применения в расчетах ряда основных контролируемых параметров (подогревы на ТВС, функционалы восстановленного поля энерговыделения, запасы до кризиса теплоотдач) для режимов работы РУ с 4-мя ГЦН (как основной эксплуатационный режим) и с 3-мя ГЦН (как наиболее неблагоприятный по возникновению существенных различий в температурах холодных ниток);
- коэффициенты влияния для режимов работы РУ с 2-мя ГЦН, полученные на энергоблоке №2 РоАЭС, целесообразно перенести для всех энергоблоков проекта В-320;
- полученные результаты имеют качественную сходимость с результатами аналогичных испытаний на АЭС «Тяньвань» и АЭС «Бушер» для режима работы РУ с 4-мя ГЦН;
- необходимо в дальнейшем продолжить проведение данных испытаний на последующих вводимых в эксплуатацию и, возможно, находящихся в промышленной эксплуатации энергоблоках АЭС

В условиях, когда проводятся работы по повышению установленной мощности энергоблоков с ВВЭР-1000 разных проектов и ожидается ввод в эксплуатацию энергоблоков нового поколения с ВВЭР-1200, применение в СВРК алгоритма расчета температурного поля на входе в активную зону с коэффициентами влияния и проведение соответствующих испытаний можно считать доказанным необходимым условием. Данные испытания являются важными для эксплуатации энергоблока в целом. Следует перевести их из вида наладочных испытаний в составе комплексных испытаний СВРК в вид эксплуатационных теплофизических испытаний при замене выемных частей ГЦН. При определенных допущениях по точности

результатов данные испытания перекрывают и цели испытаний по определению межпетлевого перемешивания теплоносителя, проводимых на мощности и относящихся к ядерно-опасным работам, Кроме этого, результаты данных испытаний могут служить хорошим материалом для использования в расчетах по обоснованию безопасности для реактивных аварий и аварийных ситуаций связанных с изменением температуры и концентрации борной кислоты в 1-м контуре, а также для отработки методик по испытаниям новых систем безопасности с пассивным принципом работы, обеспечивающих ввод борной кислоты при запроектных авариях.

Перечень сокращений и условных обозначений

АЭС	- атомная электрическая станция
БРУ-А	- быстродействующая редуцирующая установка сброса пара в атмосферу
БЗОК	- быстродействующий запорно-отсечной клапан
БЗТ	- блок защитных труб
ВВЭР	- водо-водяной энергетический реактор
ВПЭН	- вспомогательный питательный электронасос
ГПК	- главный паровой коллектор
ГЦН	- главный циркуляционный насос
ГЦТ	- главный циркуляционный трубопровод
ЗКТ	- запас до кризиса теплоотдачи
КНИ	- канал нейтронных измерений
КНИТ	- канал нейтронных и температурных измерений
ОР	- орган регулирования
ПГ	- парогенератор
ПНР	- пуско-наладочные работы
РоАЭС	- Ростовская АЭС
РУ	- реакторная установка
СВРД	- сборка внутрореакторных детекторов
СВРК	- система внутрореакторного контроля
СГИУ	- система группового и индивидуального управления
СУЗ	- система управления защитой
ТАЭС	- Тяньваньская АЭС
ТК	- термоконтроль
ТВС	- тепловыделяющая сборка
ФП	- физический пуск
ХГО	- холодно-горячая обкатка
ЭВ	- энерговыделение

Перечень использованной литературы

1. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Опыт контроля температуры теплоносителя первого контура на входе в ТВС при вводе в эксплуатацию блока №1 Тяньваньской АЭС. // Измерения, важные для безопасности реакторов: Тр. 6-го собр. Междунар. симпоз., Москва, 20-22 ноябр. 2007 г
2. Мительман М.Г., Троценко В.М. и др. Опыт эксплуатации каналов измерения нейтронного потока и температуры (КНИТ) на АЭС "Тяньвань". // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб.тр. 6-й междунар. научн.-технич. конф., Подольск, 26 мая – 29 мая 2009 г.
3. Ростовская АЭС. Блок № 2. РУ В-320. Система контроля, управления и диагностики реакторной установки. Система внутрореакторного контроля. Общее описание. 52837285.42510.432 ПД.

4. Ростовская АЭС. Блок № 2. РУ В-320. Система контроля, управления и диагностики реакторной установки. Система внутриреакторного контроля. Руководство сопровождающего физика. 52837285.42510.432 ИЗ.

5. Ю.А. Безруков, Ю.Г. Драгунов, С.А. Логвинов, Ульяновский В.Н. Исследование перемешивания потоков теплоносителя в активной зоне в корпусе ВВЭР. Атомная энергия, т.96, вып.6, 2004.

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

7. Ю.В. Саунин, А.Н. Добротворский, А.В. Семенихин. Исследование температуры теплоносителя на входе в активную зону на примере реактора Тяньваньской АЭС (Китай). Атомная энергия, т.103, вып. 2, 2007.

8. Сравнительный анализ перемешивания потоков теплоносителя в реакторе по результатам натуральных испытаний при вводе в эксплуатацию энергоблоков Тяньваньской АЭС. //Обеспечение безопасности на АЭС с ВВЭР: Сб. тр. 6-й междунар. науч.-техн. конф., Подольск, ОАО ОКБ "Гидропресс", 2009.

9. Протоколы комплексных испытаний СВРК при вводе в эксплуатацию энергоблока №2 Ростовской АЭС. 02.РО.СВРК.ЦТАИ/К.О.п-5655, 7397, 648 (н).