

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБ ОБЪЕМНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГОРЯЧИХ НИТКАХ 1-ГО КОНТУРА РУ С ВВЭР-1000

Ю.В. Саунин¹, А.Н. Добротворский¹, А.В. Семенихин¹, А. М. Абдуллаев², Г.В. Кулиш²

*1 – ОАО "Атомтехэнерго", Нововоронежский филиал "Нововоронежатомтехэнерго",
г. Нововоронеж, Россия;*

2 – НТК "Ядерный Топливный Цикл", ХФТИ, Харьков, Украина

На основе разработанной трехмерной модели распределения температуры теплоносителя в ГЦТ реактора ВВЭР-1000 проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных об объемном распределении температуры в горячих нитках петель ГЦТ для цели корректного контроля температуры на выходе из реактора и мощности первого контура реактора. Расчеты выполнены с использованием вычислительной гидродинамики (CFD).

Введение

В последнее время на всех энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 проводятся работы и выполняются мероприятия по повышению установленной электрической мощности [1, 3]. В связи с этим резко выросли требования к снижению погрешности оперативного определения штатными системами контроля и управления основных эксплуатационных параметров. Одним из таких основных параметров, контролируемых оперативным персоналом, является средневзвешенная мощность реактора. Данный параметр определяется в системе внутрореакторного контроля (СВРК) и, как показывает опыт пусконаладочных работ и эксплуатации [2, 5], имеет существенную неучтенную систематическую погрешность. Эта погрешность, в свою очередь, связана с погрешностью определения мощности реактора по параметрам 1-го контура из-за влияния температурной стратификации теплоносителя в главных циркуляционных трубопроводах (ГЦТ), особенно в горячих нитках, на показания измерительных каналов контроля температуры. Разница в показаниях по одному и тому же параметру может достигать от 3 °С до 10 °С на номинальном уровне мощности в зависимости от состава топливной загрузки и конкретного эксплуатационного состояния. Очевидно, что такие показания не должны приниматься в расчет без их коррекции, но до настоящего времени такие корректировки, если и проводятся, то не опираются на обоснованные методики и алгоритмы.

Актуальность проблемы

Несмотря на многолетний опыт эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-1000 разных проектов отсутствие вышеуказанных методик и алгоритмов можно связать с невыполнением до настоящего времени по разным причинам системных исследований для более глубокого понимания явления температурной стратификации [2]. Отсутствуют такие исследования на основании системного сбора и анализа натурных данных по всем эксплуатируемым энергоблокам с ВВЭР-1000. Также отсутствуют и сведения о проведении каких-либо исследований как на стендах и экспериментальных установках, так и с помощью модельных расчетов по известным теплогидравлическим кодам, используемым при обоснованиях безопасности, или по любым другим CFD кодам. Продолжающееся отсутствие таких исследований для действующих АЭС с ВВЭР-1000

приводит к переносу этой проблемы на новые проекты АЭС с ВВЭР.

Явление температурной стратификации теплоносителя в горячих нитках и соответствующие эксплуатационные проблемы давно отмечаются и на энергоблоках с реакторами типа PWR [6]. При этом, в странах, где эксплуатируются энергоблоки с реакторами типа PWR, исследованию температурной стратификации в ГЦТ уже уделено существенное внимание [7, 8]. Однако, и эти исследования явно недостаточны и имеют незаконченный характер исходя из сложности и большого объема требуемых работ. Кроме этого, для предоставления каких-либо определенных рекомендаций и методик, как показывает опыт, необходима привязка результатов к конкретному энергоблоку и оборудованию. Примером должного и необходимого внимания к интернациональной проблеме может служить выполненный и выполняемый объем работ различными коллективами в разных странах для исследования перемешивания теплоносителя в корпусе реактора [9]. Эти исследования определяются необходимостью обоснования безопасности при ряде реактивных авариях. Хотя и в этом вопросе можно отметить явно недостаточное использование натурных данных, что снижает ценность этих исследований и для эксплуатационных задач.

Настоящая работа подводит итог первой попытки объединения усилий двух разнопрофильных коллективов для определения возможности проведения более широкого и систематизированного комплекса работ для решения обозначенной сложной по многим факторам проблемы. Эти коллективы ранее уже представляли результаты отдельных исследований [2, 3], построенных на разных методологиях исходя из специализации и возможностей своих организаций. В работе представляются экспериментальные данные о распределении температур теплоносителя в горячих нитках ГЦТ, полученные с помощью штатных систем контроля и управления (СКУ) при вводе в эксплуатацию энергоблока №4 Калининской АЭС в одном стационарном состоянии на номинальном уровне мощности. Для этого же состояния представляются и расчетные данные, полученные с помощью CFD кода. На основании сравнительного анализа экспериментальных и опытных данных указываются возможные технические решения и объем дальнейших исследовательских работ.

Выбор объекта исследования и экспериментальные данные

Представляемые для анализа экспериментальные данные были получены на этапе опытно-промышленной эксплуатации при вводе в эксплуатацию энергоблока №4 Калининской АЭС с реактором ВВЭР-1000 серийной реакторной установкой (РУ) проекта В-320. Эти данные составляют, прежде всего, показания каналов контроля температуры теплоносителя в горячих нитках штатной СВРК. Кроме этого, для увеличения представительности и расширения возможностей сравнительного анализа представляются данные по аналогичным каналам контроля других штатных СКУ.

Расположение на горячих нитках ГЦТ петель №1 и №2 первичных преобразователей каналов контроля температуры теплоносителя всех штатных СКУ показано на рис.1. Для петли №3 расположение аналогично петле №1, а для петли №4 – аналогично петле №2. В отличие от других энергоблоков с РУ проекта В-320 на энергоблоках №3, 4 Калининской АЭС в каждой нитке ГЦТ для СВРК используются по 7 термодатчиков (6 термопар и один термометр сопротивления). Эти термодатчики установлены в термогильзах с разным азимутальным расположением по сечению и на разном расстоянии от корпуса реактора. На всех других энергоблоках в каждой нитке находятся только по 3 термодатчика СВРК (2 термопары и один термометр сопротивления). Таким образом, петлевой термоконтроль СВРК на этих энергоблоках обеспечивает более представительную и разнообразную информацию. Согласно проектным требованиям, каналы

термоконтроля в СВРК имеют существенно меньшую инструментальную погрешность по сравнению с аналогичными каналами в других СКУ. Кроме этого, для устранения возможных систематических погрешностей, для каналов температурного контроля СВРК, при пусках после ППР или длительных остановов регламентами безопасной эксплуатации требуется проведение тарировок в соответствующих режимах работы. Указанные обстоятельства определили выбор энергоблока и измерительной системы для получения экспериментальных данных.

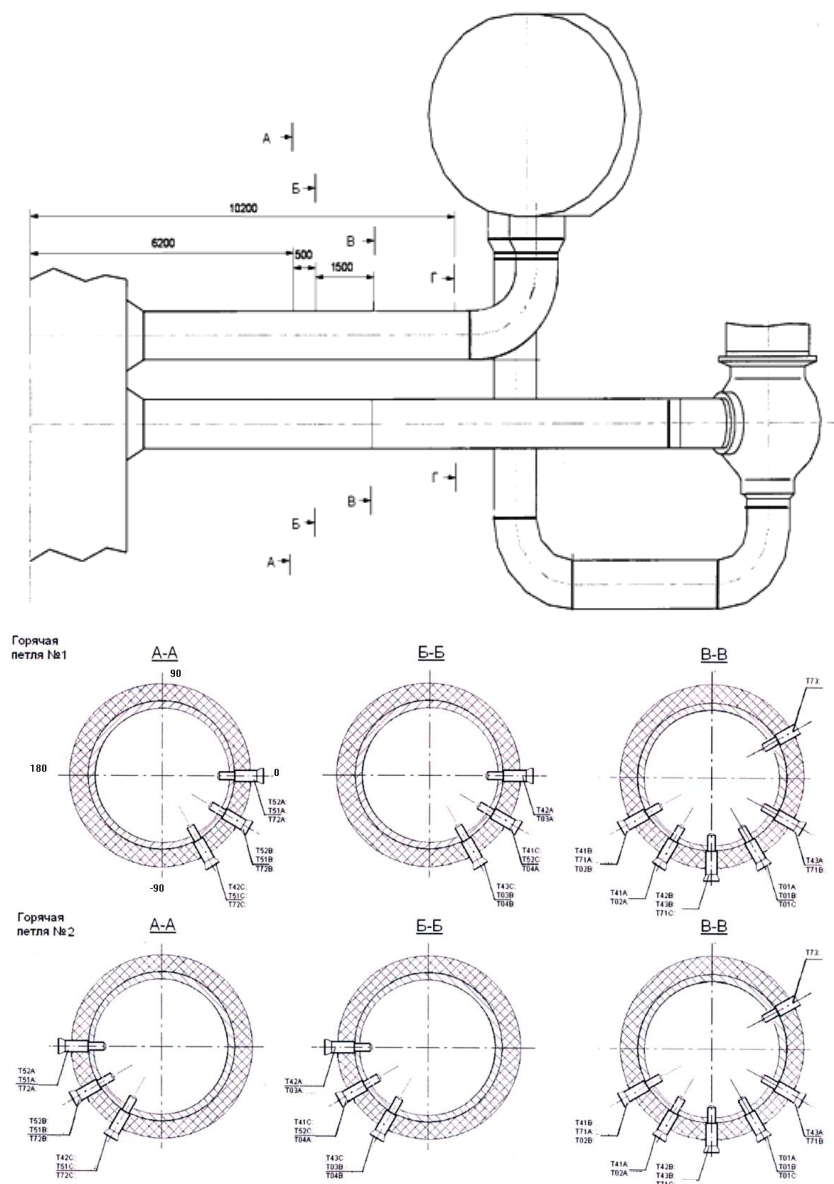


Рис.1 Расположение термодатчиков в горячих нитках ГЦТ петель №1 и №2

Экспериментальные данные получены в устойчивом стационарном состоянии с полным количеством работающих ГЦН на номинальном уровне мощности с первой топливной загрузкой при выгорании 108 эфф. суток. Устойчивое стационарное состояние подтверждалось достижением стационарного отравления ксеноном-135, отсутствием срабатываний автоматического регулятора мощности (АРМ) и проверкой выполнения критериев теплового баланса по параметрам 1-го и 2-го контуров. Из очевидных соображений, предполагается, что основной фактор, влияющий на характер температурной стратификации - это неравномерность энерговыделения в активной зоне. В частности,

для выбранного для анализа состояния она отражена на рис.2 картограммой относительных мощностей тепловыделяющих сборок (ТВС). По этой картограмме, видно, что энерговыделение в активной зоне имело хорошую 60°-ную симметрию. Данное обстоятельство играет большую роль в оценках представительности информации СВРК в части контроля энерговыделения в активной зоне и, соответственно, для интерпретации результатов выполненного анализа, а также в продолжение работы при анализах стратификации в состояниях с существенной асимметрией энерговыделения. Следующими очевидными факторами, влияющими на характер стратификации, являются конструктивные особенности внутрикорпусных устройств по тракту теплоносителя в корпусе реактора от выхода из активной зоны до патрубков горячих ниток. В настоящей работе для удобства восприятия текста соответствующие схемы и чертежи не приводятся, т.к. они не имеют принципиальных отличий от серийного ВВЭР-1000 проекта В-320.

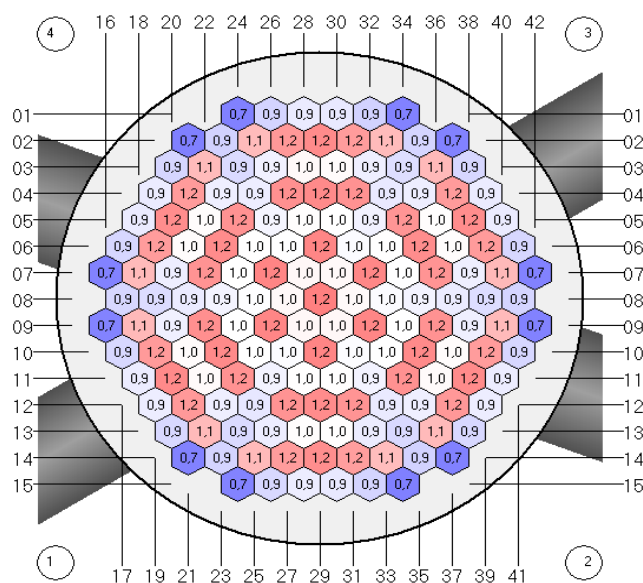


Рис.2 Картограмма относительных мощностей ТВС

Другие основные параметры реактора, необходимые для выполнения модельного расчета, представлены в **Ошибка! Источник ссылки не найден..**

Табл.1 Основные параметры реактора энергоблока №4 Калининской АЭС

Параметр	Значение			
Тепловая мощность реактора, МВт	2998			
Расход теплоносителя через реактор, кт/час	66.00			
Протечки теплоносителя				
Разделитель потока между камерами входных и выходных патрубков, %	0,1			
Каналы в выгородке активной зоны, зазор между выгородкой и шахтой, %	0,7			
Каналы для ПЭЛ и центральные трубки в кассетах, %	1,0			
Зазор между выгородкой и периферийными ТВС, %	1,2			
Общие протечки, не участвующие в отводе тепла с твэлов, %	3,0			
Параметры петель	1	2	3	4
Температура теплоносителя на входе, °С	289.3	289.2	289.3	288.9
Тепловая мощность по ПГ, МВт	763	732	764	750
Расход теплоносителя, кт/час	16.69	16.47	16.55	16.27

Метод моделирования и основные допущения

Для расчетов распределения температур в ГЦТ использован компьютерный код SolidWorks Flow Simulation (COSMOSFloWorks) - универсальный инструмент для анализа в гидрогазодинамике и теплопередаче, который представляет собой многофункциональную программу с возможностью анализа как стационарных, так и нестационарных теплогидравлических процессов. Flow Simulation является модулем гидрогазодинамического анализа в среде SolidWorks. Основой математического метода кода является моделирование конечными элементами компонентов систем с геометрической формой любой сложности.

При расчете распределения температур потока теплоносителя и его перемешивания в «горячем» тракте ГЦТ граничными условиями являются обобщенные характеристики реактора. Расход и температура теплоносителя на выходе из ТВС рассчитывается с использованием программного комплекса СТАРТ [4] на основе текущего распределения энерговыделения в ТВС (Рис.2).

Моделирование ГЦТ реактора проведено при следующих условиях:

- распределение скорости и температуры теплоносителя, температурного состояния внутрикорпусных устройств и корпуса реактора производился путем решения сопряженной задачи теплопроводности;
- в силу малого различия температуры теплоносителя по петлям на входе в реактор (Ошибка! Источник ссылки не найден.) смещение потока в опускной части реактора не учитывалось. Распределение расходов и температуры теплоносителя на выходе из ТВС приводилось к 60-ти градусной симметрии;
- в целях уменьшения вычислительного объема расчетов моделировалась только выходная, "горячая" часть ГЦТ, на участке от выхода теплоносителя из активной зоны до поворота трубопровода к парогенератору.

Результаты расчетного моделирования

Ниже для реактора энергоблока №4 Калининской АЭС (РУ В-320) приводятся результаты расчетов распределения температур теплоносителя в блоке защитных труб (БЗТ) до входа в "горячий" трубопровод реактора.

На Рис. представлено расчетное распределение температур в БЗТ реактора до входа в "горячий" трубопровод реактора.

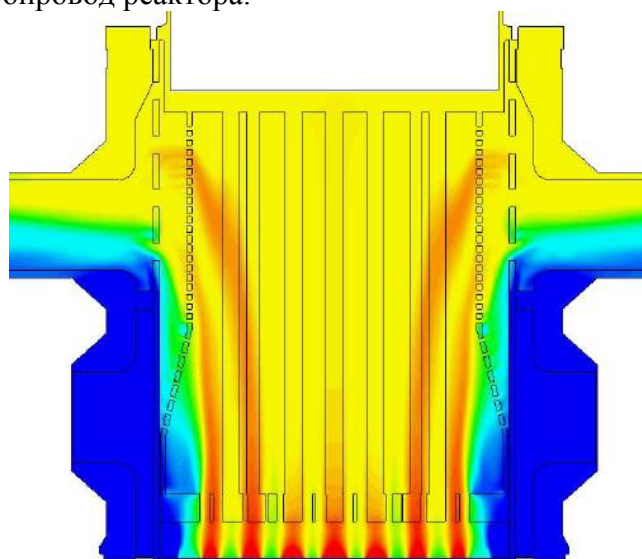


Рис.3 Распределение температур в БЗТ до выхода из реактора

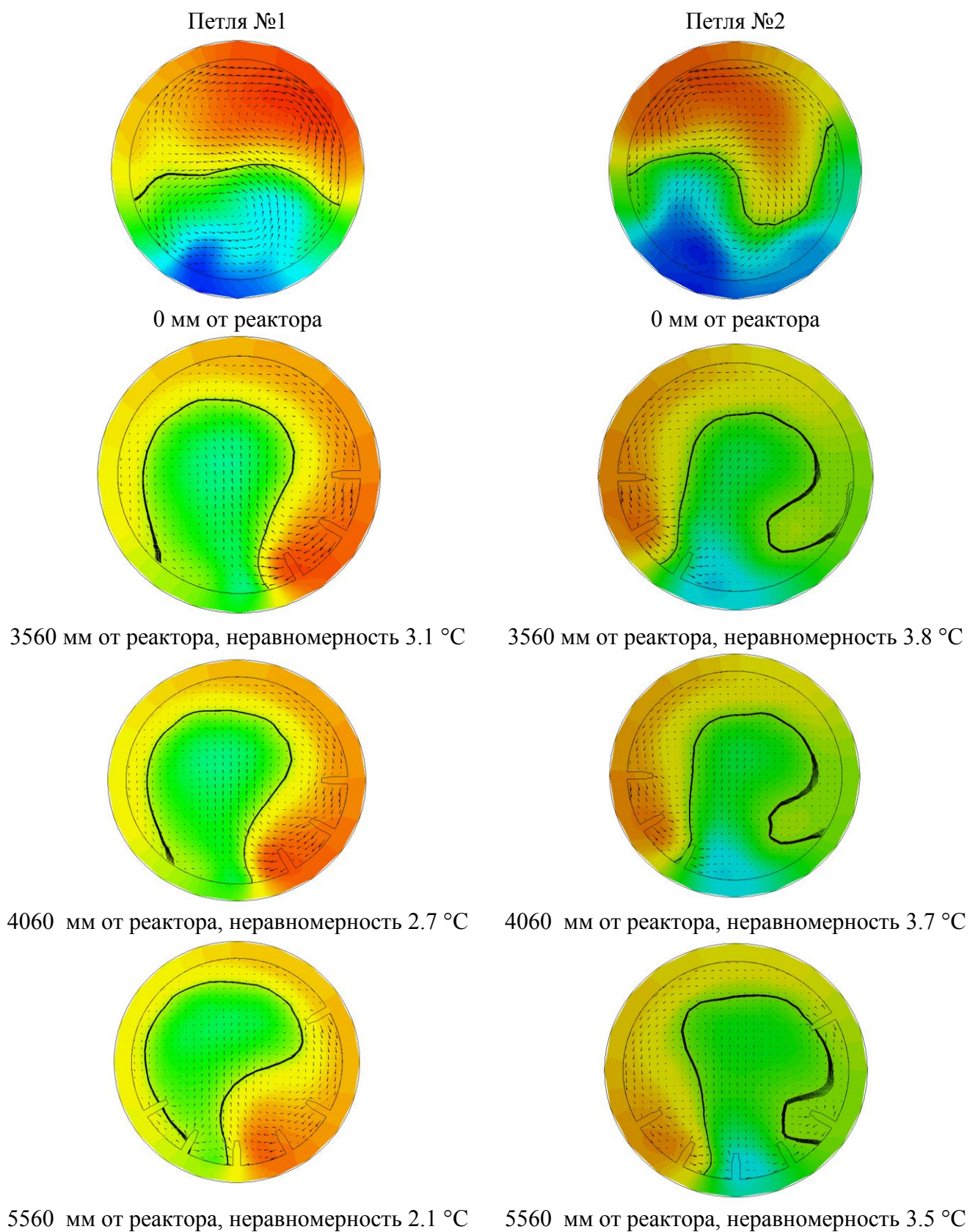


Рис. 4 Температурные поля теплоносителя в горячих нитках петель №1, 2

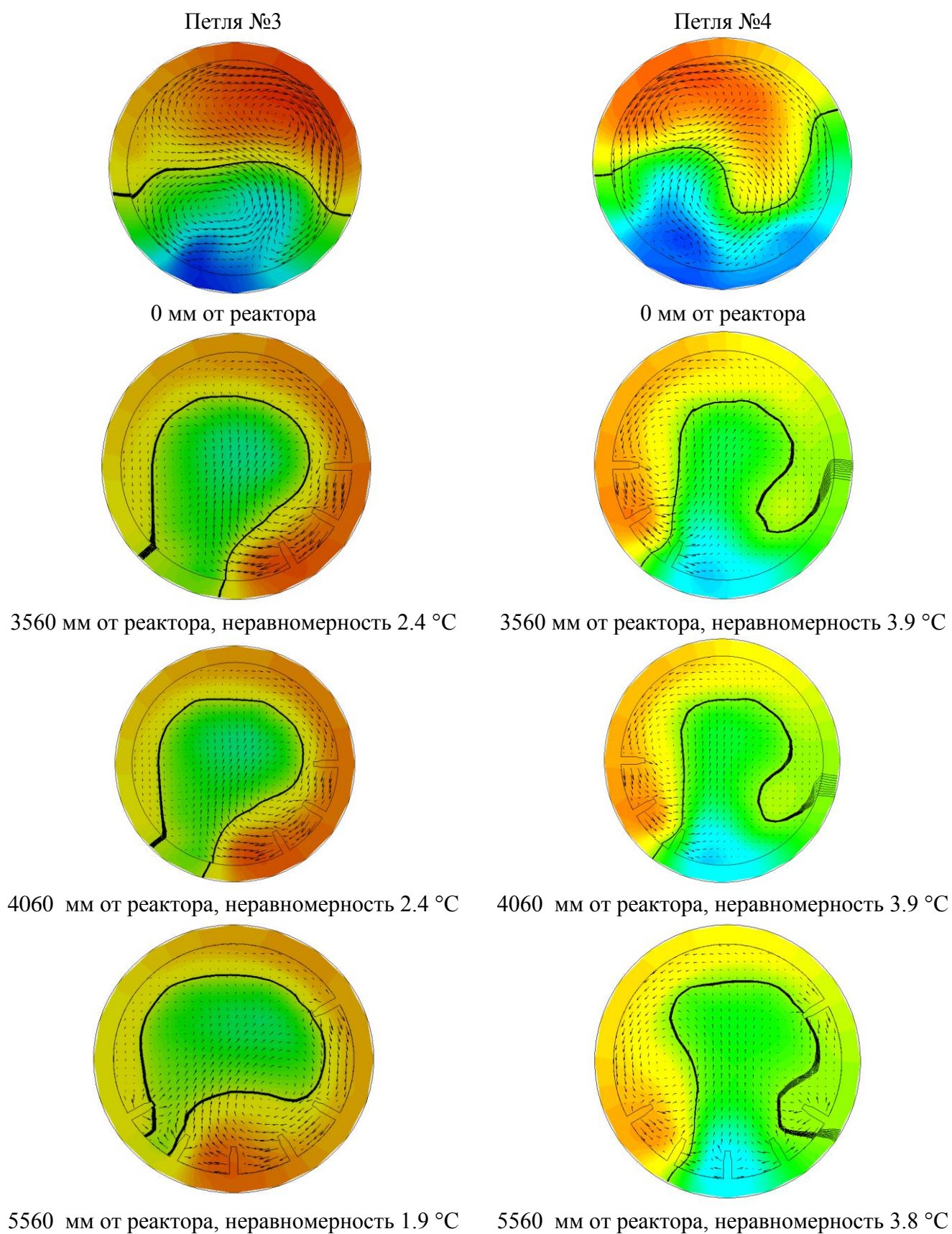


Рис.5 Температурные поля теплоносителя в горячих нитках петель №3, 4

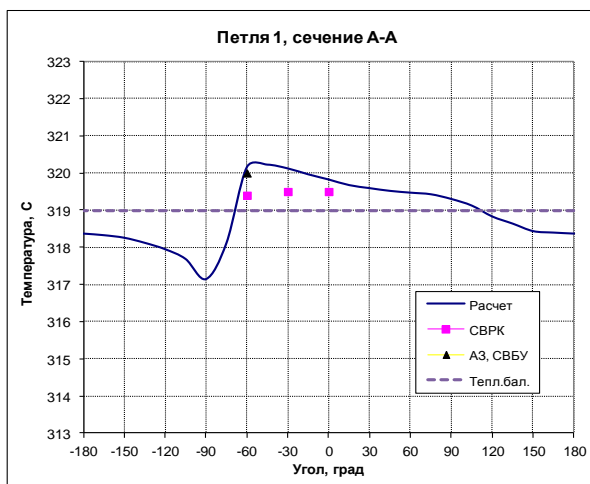
Полученные расчетные поля температур теплоносителя непосредственно на выходе из реактора и в сечениях расположения термодатчиков в горячих нитках ГЦТ приведены на Рис. 4, 5. Темными изотермами показана область сечения, имеющая средне-массовую температуру теплоносителя в петле. Стрелками показана проекция вектора направления движения теплоносителя. В каждом сечении определена неравномерность температуры теплоносителя на глубине 100 мм от внутренней поверхности трубопровода (на глубине погружения гильз термодатчиков).

Сравнение полученных расчетных распределений температуры теплоносителя в БЗТ и на входе в горячие патрубки с результатами аналогичных расчетов для других РУ с реакторами ВВЭР и PWR [7], показывает, что подтверждается общий для всех реакторов механизм формирования стратифицированных потоков в корпусе реактора на входе в горячие нитки. Наиболее нагретые струи теплоносителя и струи со средней температурой от ТВС центральной части активной зоны проходят не испытывая значительного перемешивания межтрубное пространство вплоть до перфорации обечайки БЗТ и локализуются в верхних частях выходных трубопроводов. Наиболее холодные струи от ТВС периферийного ряда, а также холодные струи протечек через выгородку и кольцевой зазор, локализуются в нижней части трубопроводов почти не перемешиваясь. При этом для данного реактора хорошо видно, что характер локализации отличается в петлях с четными и нечетными номерами.

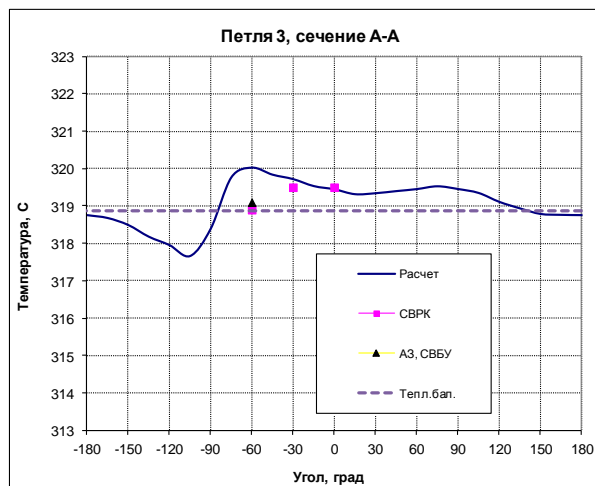
При входе в горячие нитки теплоноситель имеет максимальную температурную неравномерность и две области закрутки потока в разных направлениях в нижней и в верхней части трубопровода. Для петель с нечетными номерами в верхней части закрутка идет по ходу часовой стрелки, а в нижней части против хода часовой стрелки. Для петель с четными номерами направления закруток в верхней и нижней части противоположны направлениям закруток в петлях с нечетными номерами. По мере движения потока по трубопроводу происходит его вращение, которое способствует перемешиванию и уменьшению неравномерности. Однако приемлемая для измерений неравномерность, очевидно, устанавливается на больших расстояниях от мест расположения термодатчиков. Так в проекте с РУ В-320 самые дальние врезки находятся на расстоянии 5.56 м от корпуса реактора, а в проекте с РУ В-338 они находятся на расстоянии 7.2 м, но и на этом расстоянии неравномерность все еще имеет существенные значения [3].

На Рис. 6, 7 представлены рассчитанные и измеренные температуры в сечениях расположения термодатчиков на глубине 100 мм от внутренней поверхности трубопровода, на глубине погружения гильзы термодатчика (ТД), для петель 1, 3 и 2, 4, соответственно. Градусная сетка на этих рисунках соответствует обозначению градусной сетки сечения А-А для петли №1 на Рис.1. В каждом сечении определено среднеквадратичное отклонение (СКО) рассчитанных значений температуры теплоносителя от измеренных значений по показаниям ТД СВРК с исключением из обработки резко выделяющихся значений. Во всех сечениях, кроме одного, СКО не превышало общую погрешностью измерения ТД СВРК с индивидуальной градуировкой, равной ± 1 °С. При этом СКО по всем сечениям для всех петель составило 0.9 °С. этой температурой.

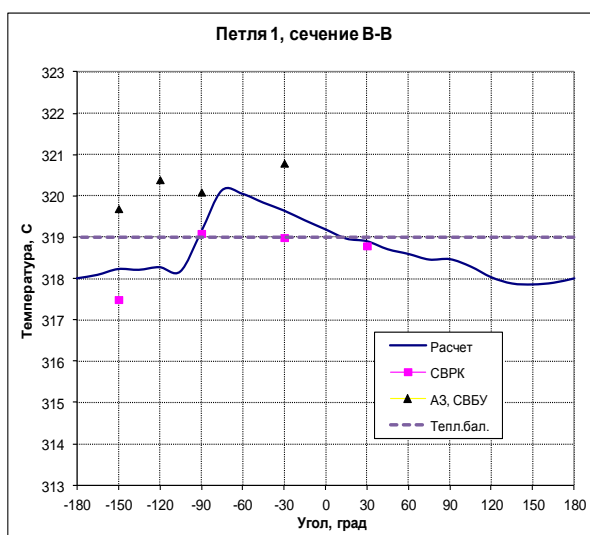
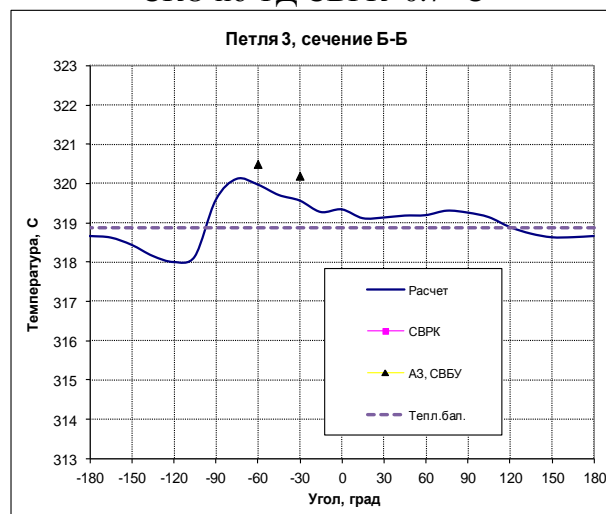
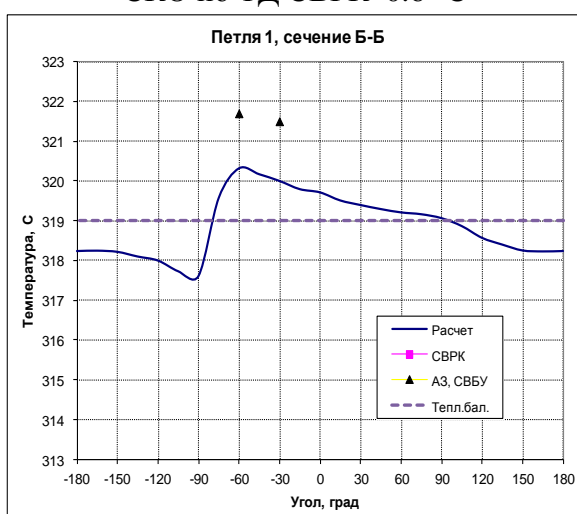
Вышеуказанные результаты позволяют говорить об удовлетворительной сходимости экспериментальных и расчетных данных. Это подтверждается и тем, что разница между расчетной средневзвешенной температурой в горячих нитках и на основании сведения тепловых балансов не превышает 0.5 °С.



СКО по ТД СВРК 0.6 °С

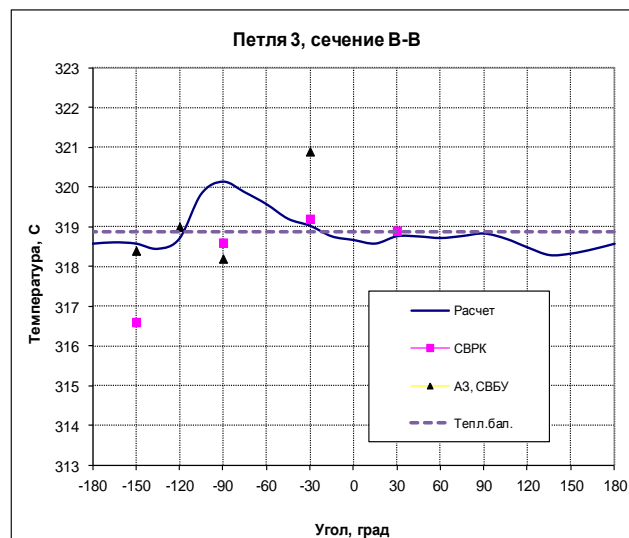


СКО по ТД СВРК 0.7 °С



СКО по ТД СВРК 0.5 °С

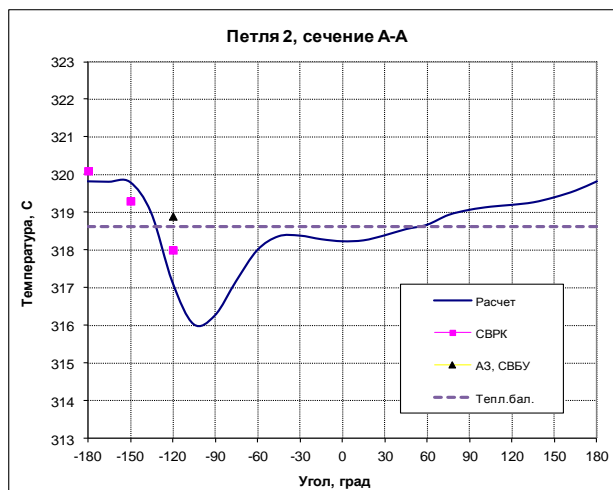
Петля №1



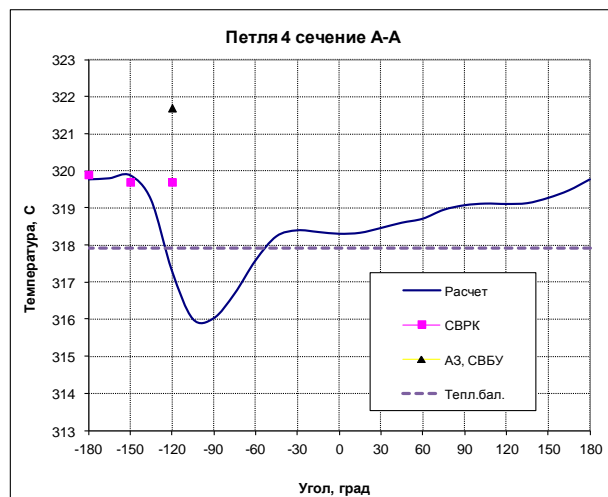
СКО по ТД СВРК 0.9 °С

Петля №3

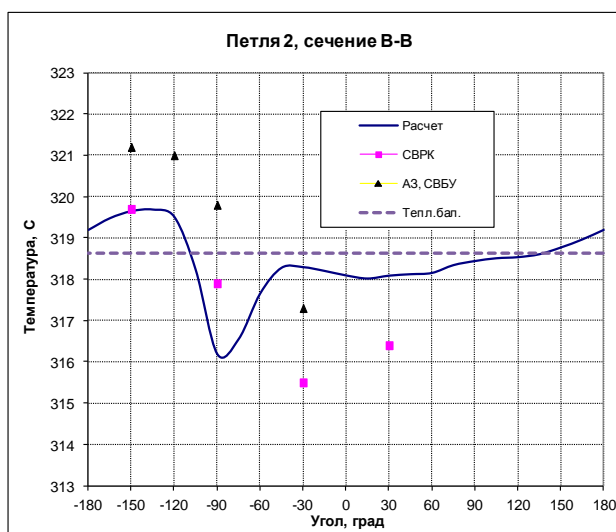
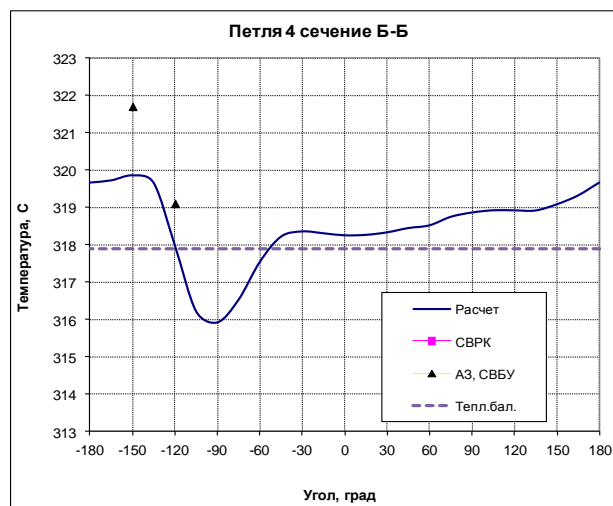
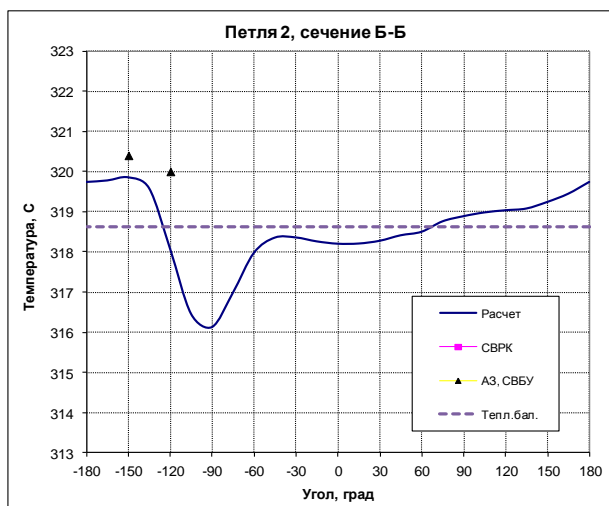
Рис. 6 Расчетные и измеренные температуры в петлях №1 и №3



СКО по ТД СВРК 0.6 °С

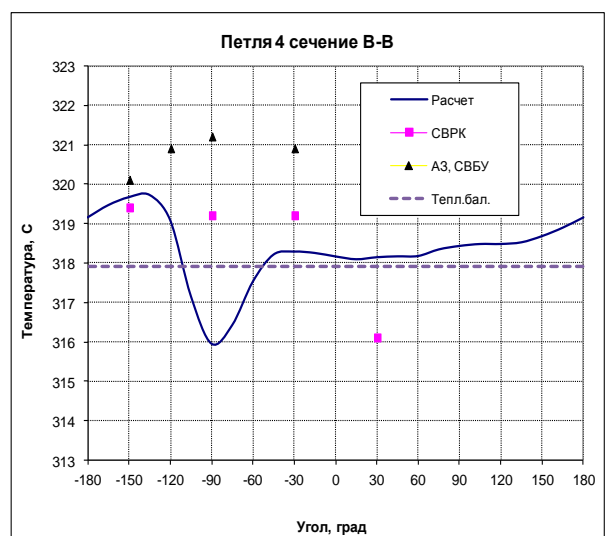


СКО по ТД СВРК 0.2 °С



СКО по ТД СВРК 1.2 °С

Петля №2



СКО по ТД СВРК 0.7 °С

Петля №4

Рис. 7 Расчетные и измеренные температуры в петлях №2 и №4

Вместе с тем, характер расчетных и экспериментальных распределений свидетельствует о том, что принятая модель не в полной мере соответствует реальным процессам или конструктивным особенностям. В частности, можно предположить, что имеется некоторая недооценка расчетом с помощью CFD кода влияния несимметричности перфорации в обечайке БЗТ в области расположения патрубков САОЗ (Рис.8). Кроме этого, возможно на результат расчета влияет исключение закрутки потока в опускной части реактора. На такое предположение наталкивают результаты испытаний по определению температурного поля на входе в активную зону, выполненные на разных энергоблоках с ВВЭР-1000. Их сравнительный анализ показал, что именно на энергоблоке №4 Калининской АЭС угол закрутки потоков теплоносителя в корпусе реактора был самым большим и, соответственно, отмечалось наиболее интенсивное перемешивание петлевых потоков [10].

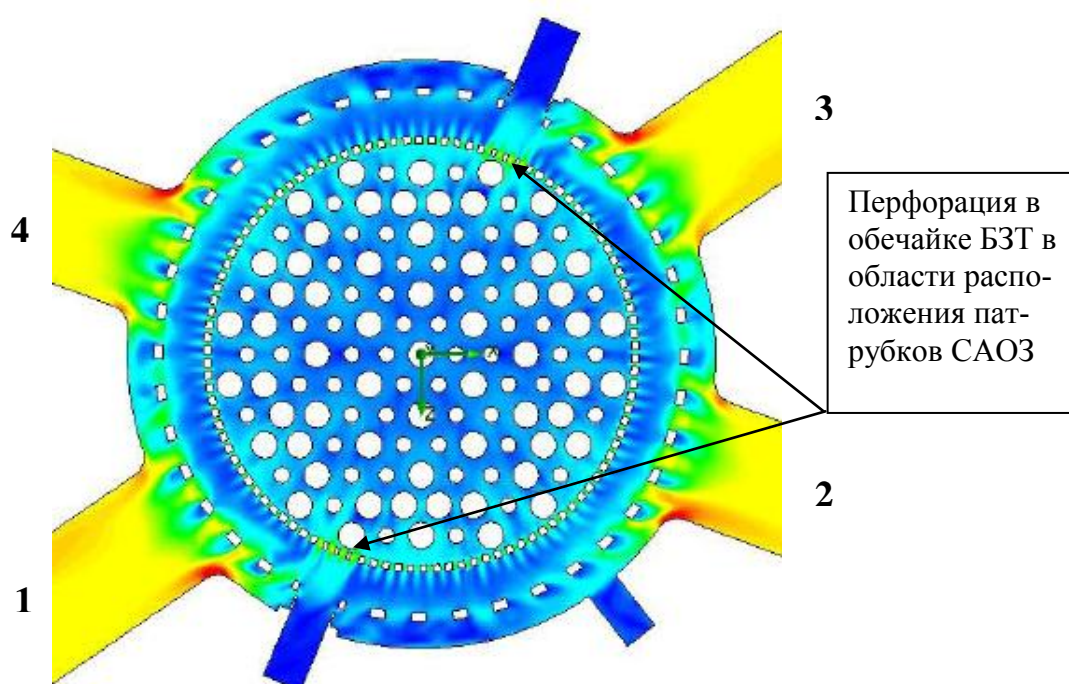


Рис. 8 Распределение скорости теплоносителя в сечении реактора на уровне горячих ниток

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы и рекомендации относительно возможностей учета эффекта температурной стратификации при эксплуатации и проектировании энергоблоков с ВВЭР и PWR:

1. Проектные и эксплуатационные пределы по температуре теплоносителя в горячих нитках и, связанным с ней параметрам, должны устанавливаться и пересматриваться с учетом натурных испытаний и результатов расчетов объемных распределений температуры теплоносителя в горячих нитках ГЦТ по CFD кодам.

2. Алгоритмы функционирования СВРК должны обеспечивать возможность подключения к расчетам средневзвешенных температур информации измерительных каналов контроля температур теплоносителя в нитках ГЦТ от всех штатных СКУ.

3. В новых проектах энергоблоков АЭС с ВВЭР и PWR места расположения термодатчиков по длине трубопровода необходимо предусмотреть на максимально возможном расстоянии от корпуса реактора, а места расположения в одном сечении распределять равномерно по всему периметру сечения трубопроводов.

Более определенные выводы могут быть получены только при продолжении исследований на основе сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных в разных эксплуатационных состояниях. Набор этих состояний должен включать состояния, которые позволят определить влияние уровня мощности реактора, выгорания топлива, офсета, асимметрии энерговыделения и т.д.

Заключение

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных объемного распределения температуры теплоносителя в горячих нитках 1-го контура, выполненный для серийной РУ проекта В-320, показывает их хорошее качественное совпадение.

Среднеквадратичное отклонение рассчитанных и измеренных температур в сечениях ГЦТ составило 0,9 °С, что соизмеримо с общей погрешностью измерения ТП СВРК с индивидуальной градуировкой, равной ± 1 °С.

Необходимо продолжить работы по повышению точности расчетов с помощью CFD кодов путем большей детализации и максимального приближения расчетной модели к реальной конструкции реактора на основании сравнения с экспериментальными данными, полученными в различных эксплуатационных состояниях.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ПРО ОБ'ЄМНИЙ РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ В ГАРЯЧИХ НИТКАХ 1-ГО КОНТУРА РУ З ВВЕР-1000

Ю. В. Саунін, А.Д. Добротворскій, А.В. Семеніхін, А. М. Абдуллаєв, Г. В. Куліш

На основі розробленої тривимірної моделі розподілу температури теплоносія в ГЦТ реактора ВВЕР-1000 проведений порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних про об'ємний розподіл температури в гарячих нитках петель ГЦТ для мети коректного контролю температури на виході з реактора і потужності першого контура реактора. Розрахунки виконані з використанням обчислювальної гідродинаміки (CFD)

COMPARATIVE ANALYSIS Of MEASURED And CALCULATED DATA Of 3D FLOW TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE VVER-1000 MAIN COOLANT PIPE

Y.V. Saunin, A.D. Dobrotvorskiy, A.V. Semenikhin, A.M. Abdullaev, G.V. Kulish,

There was developed a 3D flow temperature distribution model for the WVER-1000 Main Coolant Pipe. The temperature no uniformity in the Main Coolant Pipe hot legs was analyzed to correctly account for the reactor outlet temperature control and the reactor primary circuit power. The calculations were done using Computational Fluid Dynamics (CFD).

Список использованных источников

1. Соколов Д.А., Ким В.В., Кузнецов В.И. "Повышение мощности ВВЭР-1000", Труды Одесского политехнического университета, 2007, вып. 2(28).
2. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. " Экспериментальная оценка некоторых факторов, определяющих стратификацию теплоносителя в горячих нитках петель 1-го контура РУ с ВВЭР -1000", Восьмая меж-

- дународная научно-техническая конференция, "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики", Москва, 23-25 мая 2012.
3. Кулиш Г.В., Абдуллаев А.М., Слепцов С.Н. Соколов Д.А., Лашевич П.Л., Арванинов А.Л. "Трехмерное распределение температуры теплоносителя в ГЦТ реактора энергоблока №2 Южноукраинской АЭС", Восьмая международная научно-техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", г. Подольск, 28-31 мая 2013 г.
 4. Кулиш Г.В. "Расчет распределения потока теплоносителя в активной зоне энергоблока №3 ЮУ АЭС в 21-ю - 24-ю топливные кампании", CN-LFD-08-07, Редакция 0, ЦПАЗ, 2007
 5. Бай В.Ф., Богачек Л.Н, Макаров С.В., Лупишко А. Н. "Состояние внутриреакторного термоконтроля и анализ основных теплофизических характеристик РУ на блоках Калининской АЭС", Безопасность, экономика и эффективность атомной энергетики: Сб. тр. 7-й междунар. научн-технич. конф., Москва, 2010 г.
 6. Hashemian H.M. "Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
 7. Chiang J.S.C. at al. "Pressurized Water Reactor (PWR) Hot-leg Streaming. Part 1: Computation Fluid Dynamics (CFD) Simulations", Nuclear Engineering and Design. Vol. 24, Issue 5, 2011.
 8. Smith B.L. "Assessment of CFD Codes Used in Nuclear Reactor Safety imulations", Nuclear Engineering and Technology. Vol. 42, No. 5, Aug. 2010.
 9. Kolev N. at al. "The OECD VVER-1000 Coolant Transient", Benchmark Phase 2 (V1000CT-2) Volume 1: Specifications of the Coolant Mixing Problem, NEA/NC DOC, 2004.
 10. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. "Исследование температуры теплоносителя на входе в активную зону при вводе в эксплуатацию энергоблока №2 Ростовской АЭС", Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб.тр. 7-й междунар. научн.-технич. конф., Подольск, 2011 г

Сведения об авторах:

Саунин Юрий Васильевич,

Должность: начальник участка, ОАО "Атомтехэнерго", Нововоронежский филиал "Нововоронежатомтехэнерго"

Сл. адрес: 396072, Россия, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Южное шоссе, д.1

рабоч. тел.: (473 64) 35-289, факс: (473 64) 2-14-95; 2-12-02

e-mail: sauninyv@yandex.ru

Подпись

Добротворский Александр Николаевич,

Должность: ведущий инженер, ОАО "Атомтехэнерго", Нововоронежский филиал "Нововоронежатомтехэнерго"

Сл. адрес: 396072, Россия, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Южное шоссе, д.1

рабоч. тел.: 473 64) 35-284, факс: (473 64) 2-14-95; 2-12-02

e-mail: atesvrk@yandex.ru

Подпись

Семенihin Александр Васильевич,

Должность: инженер 1-й категории, ОАО "Атомтехэнерго", Нововоронежский филиал "Нововоронежатомтехэнерго"

Сл. адрес: 396072, Россия, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Южное шоссе, д.1

рабоч. тел.: 473 64) 35-284, факс: (473 64) 2-14-95; 2-12-02

e-mail: atesvrk@yandex.ru

Подпись

Абдуллаев Акиф Мирдадаш-Оглы,

Должность: главный инженер проекта НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ

Сл.адрес: 61108, г.Харьков, ул.Академическая, 1,

рабоч.тел.:(380 57) 335-37-63, факс (380 57) 335-37-74,

e-mail: am_abd@kipt.kharkov.ua

Подпись

Кулиш Григорий Васильевич,

Должность - научный сотрудник ЦПАЗ, НТК «Ядерный топливный цикл», ННЦ ХФТИ

Сл. адрес: 61108, г. Харьков, ул. Академическая 1, ЦПАЗ ННЦ ХФТИ,

рабоч. тел.: (380 57) 335 3749, факс: (380 57) 335 3774,

e-mail: kulish@kipt.kharkov.ua

Подпись