

ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПО CFD КОДАМ В АНАЛИЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОБЪЕМНОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГОРЯЧИХ НИТКАХ ПЕТЕЛЬ 1-ГО КОНТУРА РУ С ВВЭР-1000

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

Кулиш Г.В., Абдуллаев А.М.
НТК "Ядерный Топливный Цикл", ХФТИ, Харьков, Украина

Введение

В последнее время на всех энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 проводятся работы и выполняются мероприятия по повышению установленной электрической мощности [1, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. В связи с этим резко выросли требования к снижению погрешности оперативного определения штатными системами контроля и управления (СКУ) основных эксплуатационных параметров. Одним из таких основных параметров, контролируемых оперативным персоналом, является средневзвешенная тепловая мощность реактора. Данный параметр определяется в системе внутриреакторного 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. Необходимость в таких методиках подтверждена программой работ по повышению точности определения среднемассовой температуры теплоносителя в горячих нитках петель, принятой в ОАО "Концерн Росэнергоатом".

Обзор 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 [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. В открытых публикациях нет упоминаний о таких исследованиях путем системного сбора и анализа натурных данных по всем эксплуатируемым энергоблокам с ВВЭР-1000. Также отсутствуют и сведения о проведении каких-либо экспериментальных 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]. Таким образом, можно говорить о достаточно серьезной международной проблеме, связанной с безопасностью и эффективностью эксплуатации АЭС. 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 его 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 уже представляли результаты отдельных исследований по данной проблеме [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.], построенных на разных методологиях исходя из специализации и возможностей своих организаций. В данной 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

Взятые 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 были взяты данные по аналогичным каналам контроля и 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 проекта В-320 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 ра-

боты. Указанные обстоятельства определили выбор энергоблока и измерительной системы для получения экспериментальных данных.

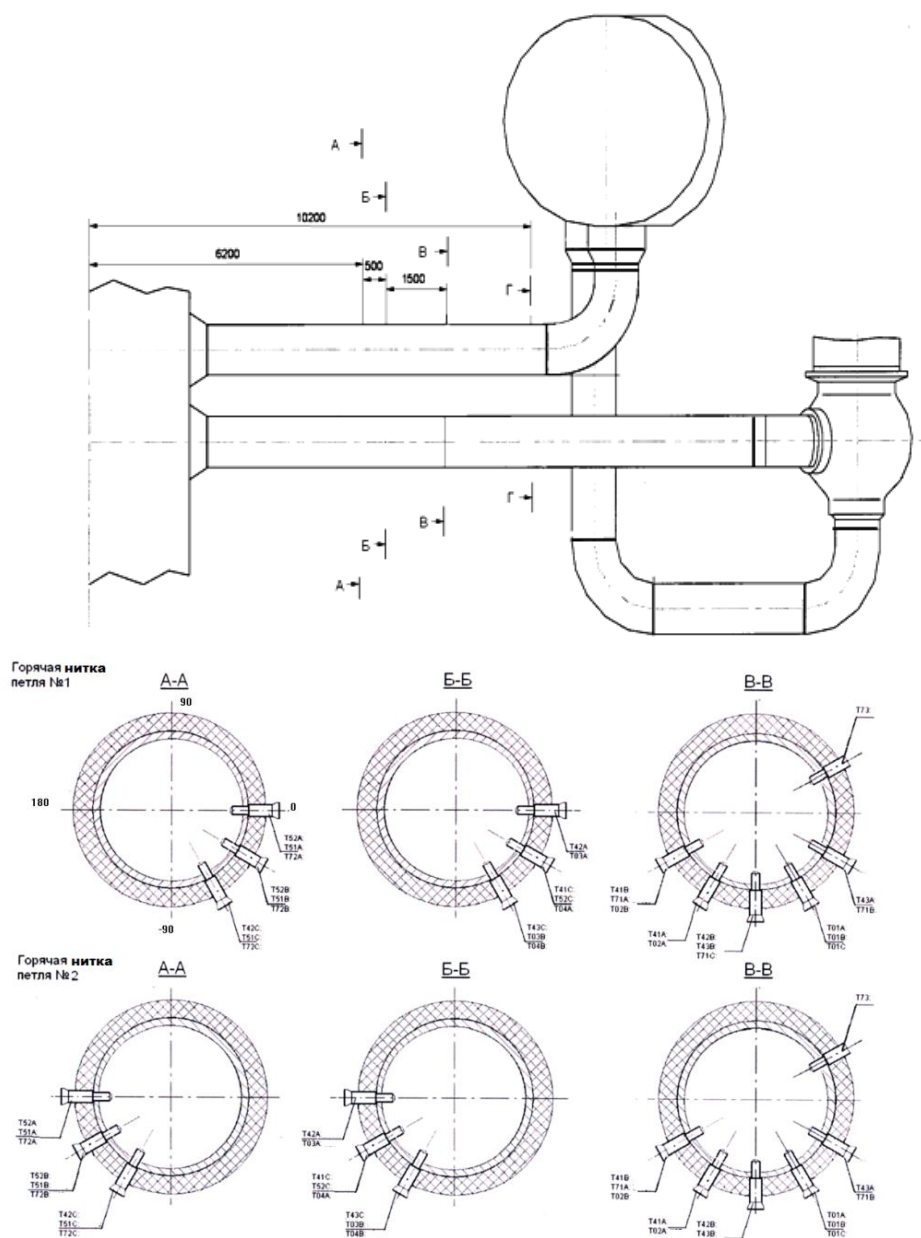


Рис. 1. Расположение термодатчиков в горячих нитках ГЦТ петель №1 и №2

Экспериментальные данные были 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.

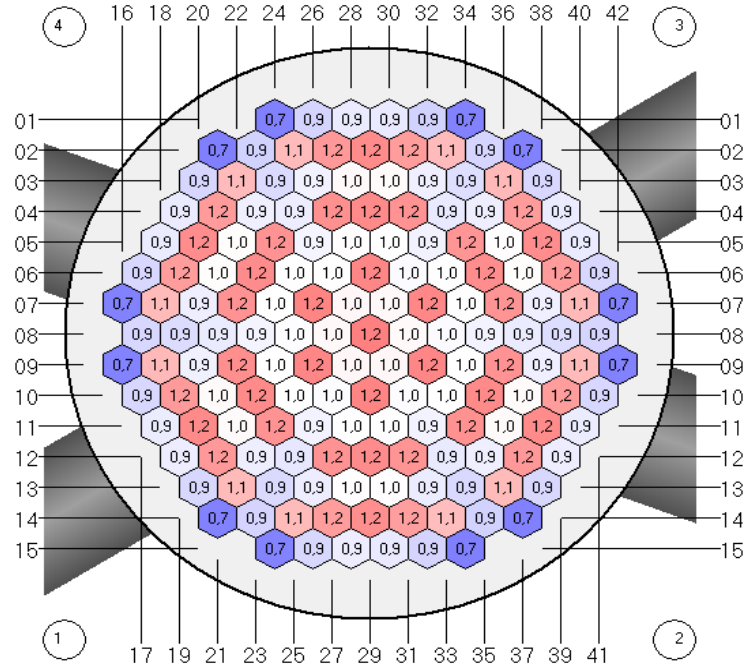


Рис. 2. Картограмма относительных мощностей ТВС

Другие основные параметры реактора, необходимые для выполнения модельного расчета, представлены в нижеприведенной таблице.

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

Параметр	Значение			
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 обтекательные характеристики реактора. Расход и температура теплоносителя на выходе из ТВС рассчитывается с использованием программного комплекса СТАРТ [4] на основе текущего распределения энерговыделения в ТВС (см. рис.2).

Моделирование ГЦТ реактора проведено при следующих условиях:

- расчет распределения 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 (см. табл.1) 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.3 представлено расчетное распределение температур в БЗТ реактора до входа в "горячий" трубопровод реактора.

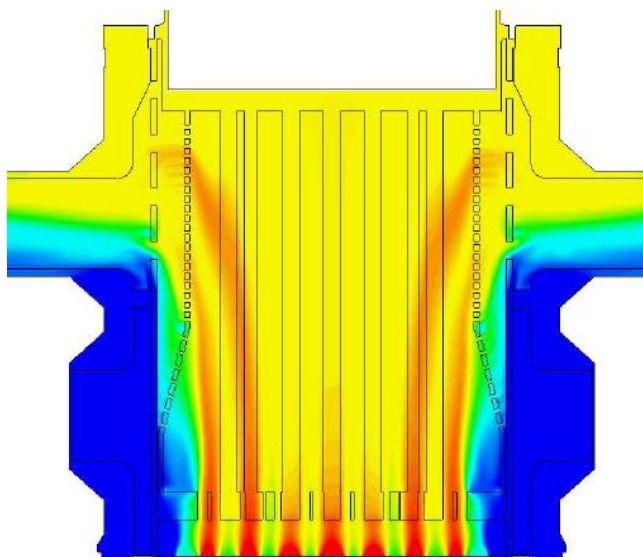
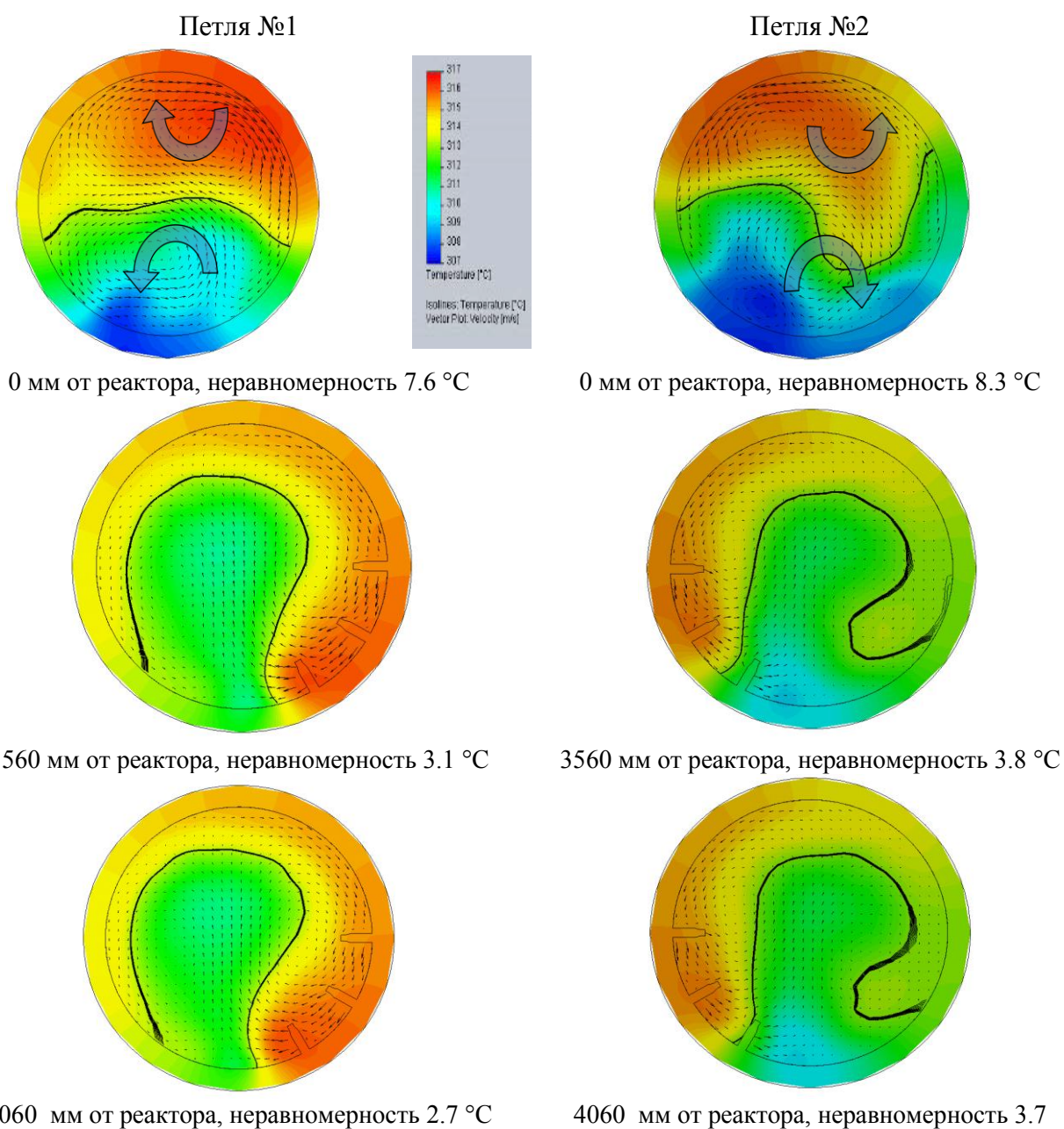
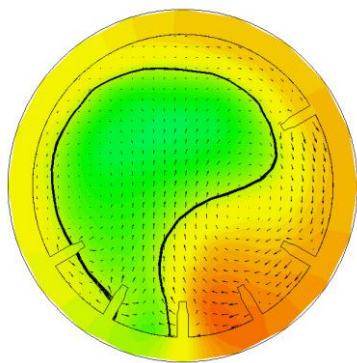
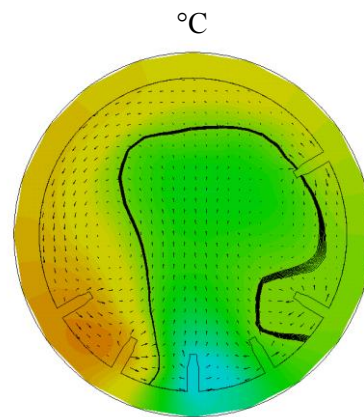


Рис. 3. Распределение температур в БЗТ до выхода из реактора





5560 мм от реактора, неравномерность 2.1 °C



5560 мм от реактора, неравномерность 3.5 °C

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

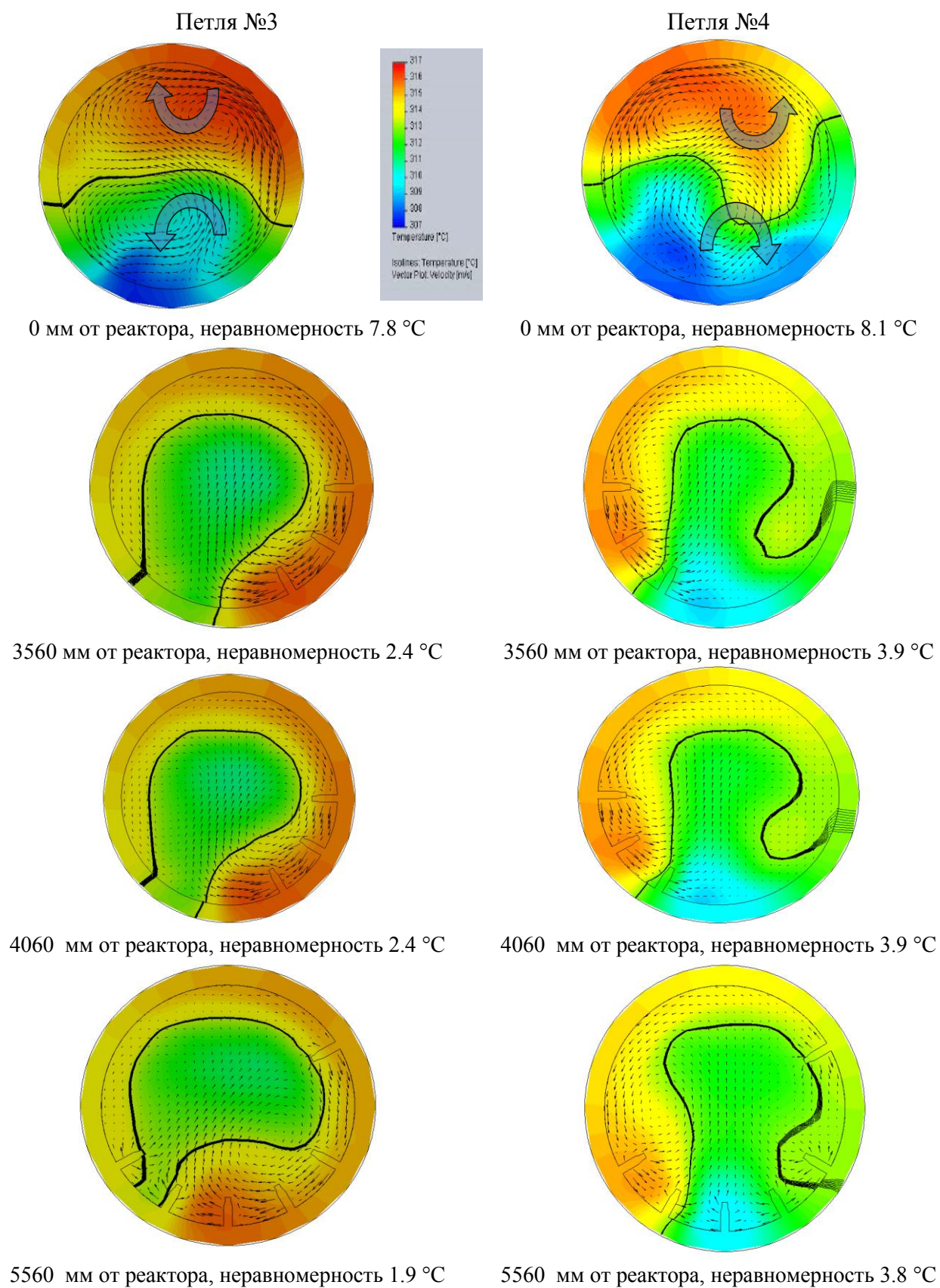


Рис. 5. Температурные поля теплоносителя в горячих нитках петель №3, 4

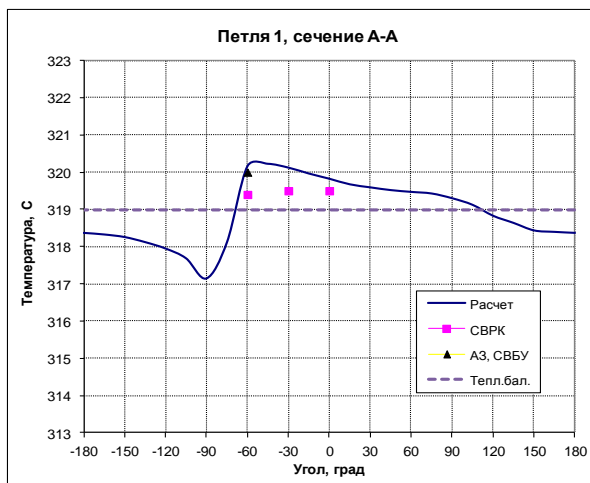
Полученные расчетные поля температур теплоносителя непосредственно на выходе из реактора и в сечениях расположения термодатчиков в горячих нитках ГЦТ приведены на рис. 4, 5. Темными изотермами показана область сечения, имеющая среднемассовую температуру теплоносителя в петле. Стрелками показана проекция 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.

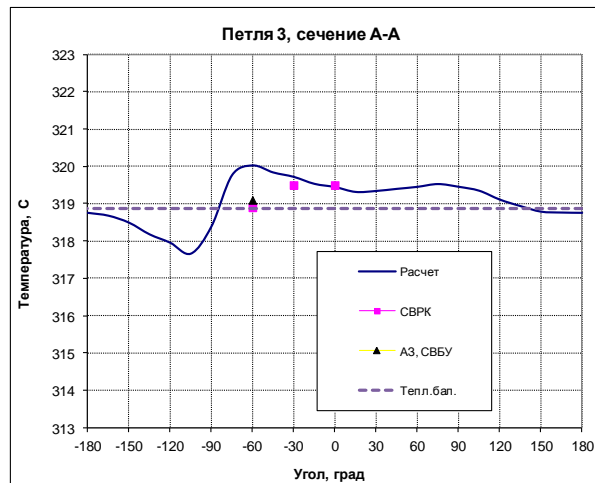
При входе в горячие нитки теплоноситель имеет максимальную температурную неравномерность и две области закрутки потока в разных направлениях в нижней и в верхней части трубопровода. Для петель с нечетными номерами в верхней части закрутка идет по ходу часовой стрелки, а в нижней части против хода часовой 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 [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

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 погрешность измерения ТД СВРК с индивидуальной градуировкой, равной ± 1 °С. При этом СКО по всем сечениям для всех петель составило 0.9 °С.

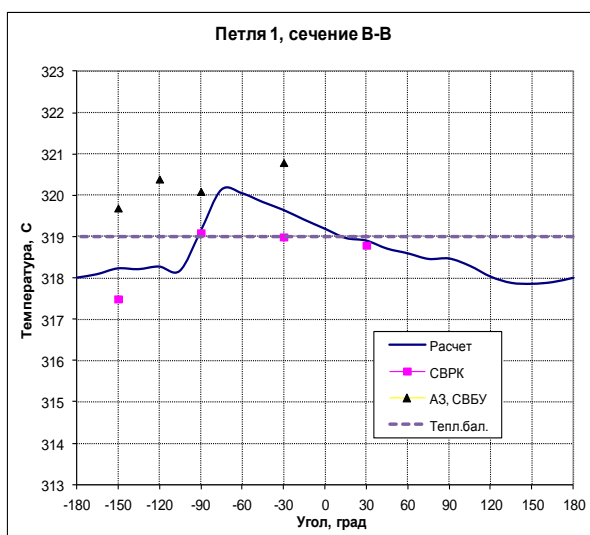
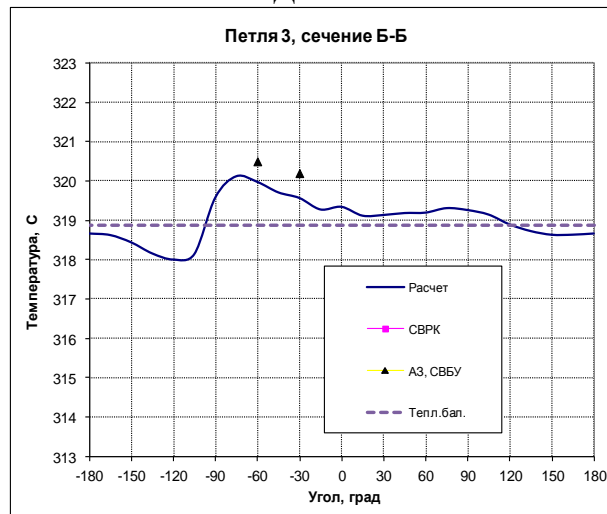
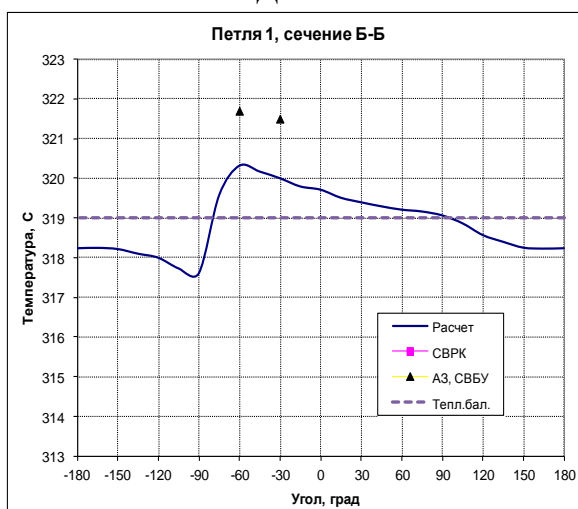
Вышеуказанные результаты позволяют говорить об удовлетворительной сходимости экспериментальных и расчетных данных. Это подтверждается и тем, что разница между расчетной средневзвешенной температурой в горячих нитках и на основании сведения тепловых балансов не превышает 0.5 °С.



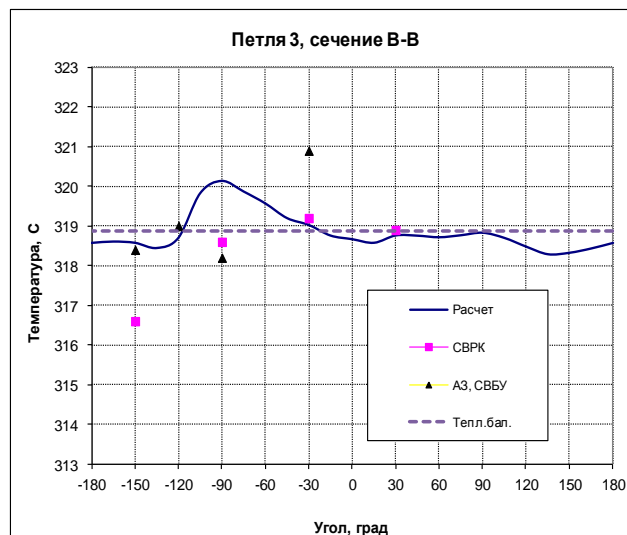
СКО по ТД СВРК 0.6 °С



СКО по ТД СВРК 0.7 °С

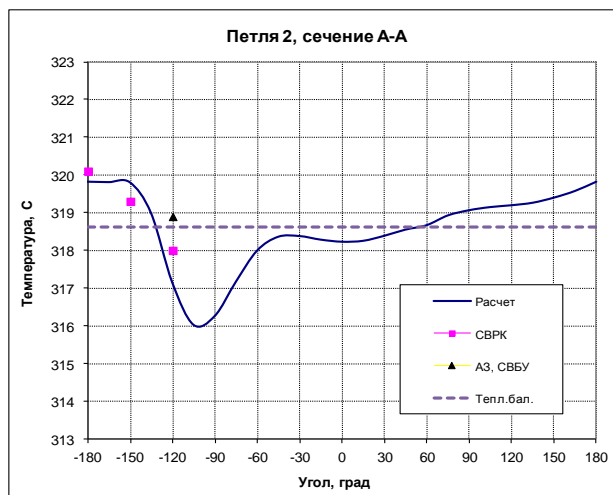


СКО по ТД СВРК 0.5 °С

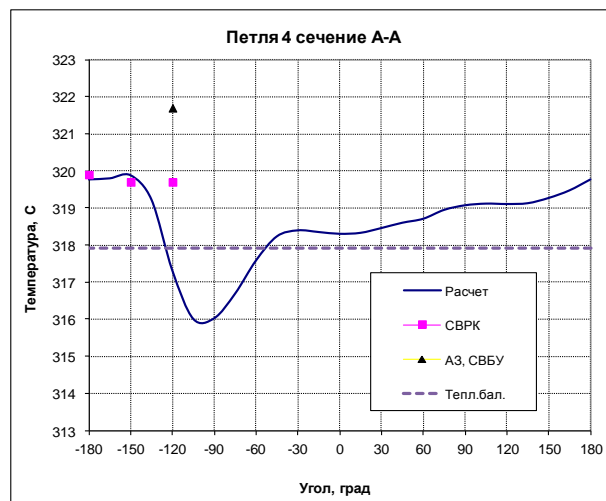


СКО по ТД СВРК 0.9 °С

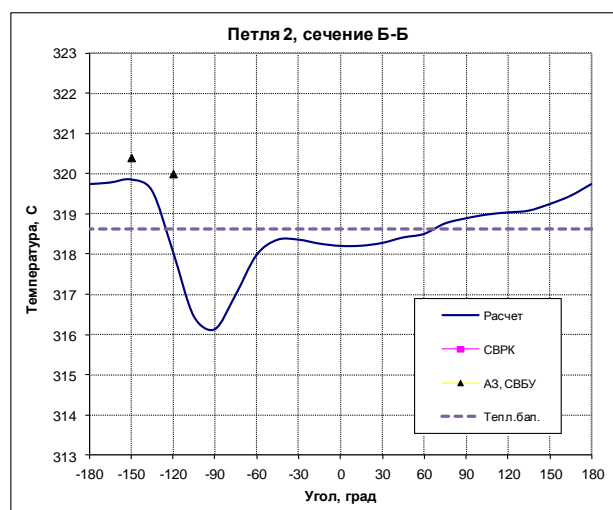
Рис. 6. Расчетные и измеренные температуры в петлях №1 и №3



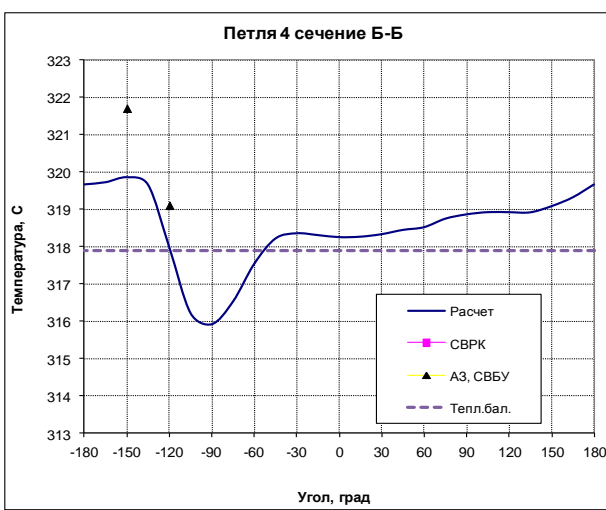
СКО по ТД СВРК 0.6 °С



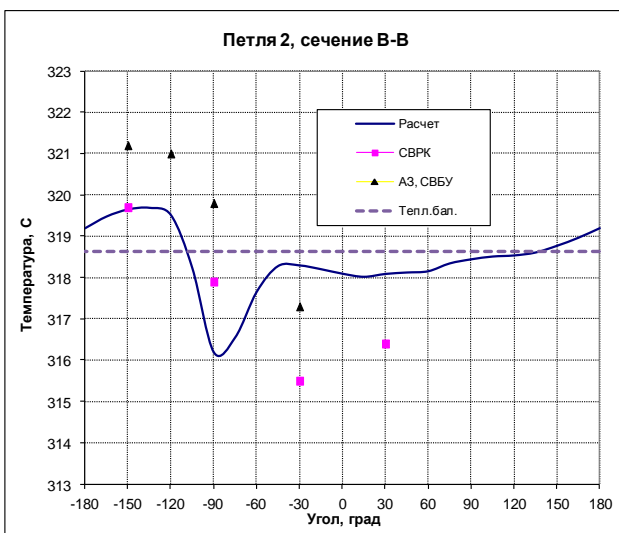
СКО по ТД СВРК 0.2 °С



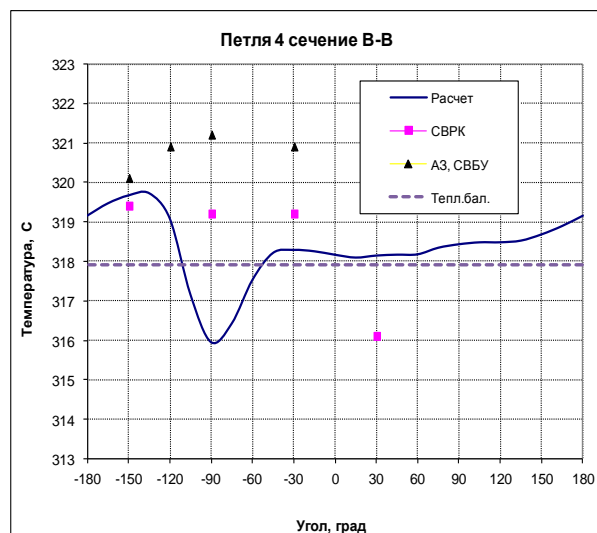
-



-



СКО по ТД СВРК 1.2 °С



СКО по ТД СВРК 0.7 °С

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

Вместе с тем, характер расчетных и экспериментальных распределений свидетельствует о том, что использованная модель не в полной мере соответствует реальным процессам и/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 (см. 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].

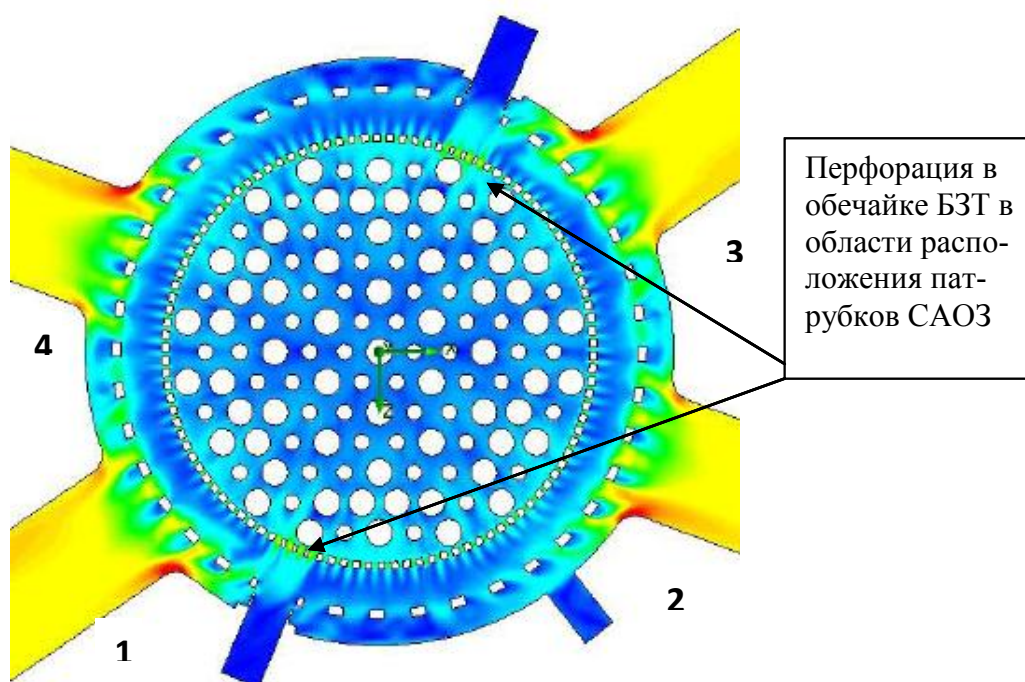


Рис. 8. Распределение скорости теплоносителя в сечении реактора на уровне горячих ниток

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 состоя-

ния, которые позволят определить влияние уровня мощности реактора, выгорания топлива, офсета, асимметрии энерговыделения и т.д

Выводы

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 $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соизмеримо с общей погрешностью измерения ТП СВРК с индивидуальной градуировкой, равной $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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.

Список литературы

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// Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Сб. тр. 8-й междунар. научн.-техническ. конф., - 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// Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб. тр. 8-й междунар. научн.-техническ. конф., - г. Подольск, 28-31 мая 2013.
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 г.
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.-техническ. конф., - Москва, 2010.
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 simulations// 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