

ТРЕХМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГЦТ РЕАКТОРА ЭНЕРГОБЛОКА №2 ЮЖНОУКРАИНСКОЙ АЭС

Г.В. Кулиш, Д.А. А.М. Абдуллаев, С.Н. Слепцов
ЦПАЗ НТК «Ядерный Топливный Цикл», ХФТИ, Харьков, Украина

Д.А. Соколов, П.Л. Лашевич, А.Л. Арванинов
ОП «Южноукраинская АЭС», Украина

Введение

Главным приоритетом деятельности НАЭК "Энергоатом" являются работы, направленные на обеспечение безопасности и надежности АЭС. При этом, отыскание и реализация резервов увеличения выработки электроэнергии энергоблоков АЭС, в том числе за счет повышения мощности, является актуальной задачей [1].

Эксплуатация реакторов требует оперативного контроля основных теплофизических параметров активной зоны. Эта задача возложена на систему внутриреакторного контроля (СВРК). Контроль мощности основан на определении нейтронной и тепловой мощности реактора. Для определения тепловой мощности реактора используются измерительные каналы температуры в первом и втором контуре.

Опыт эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 показывает, что в "горячих" нитках петель 1-го контура наблюдается существенная стратификация теплоносителя (струйный эффект). Данное явление оказывает существенное влияние на показания температурных датчиков и, в конечном итоге, на корректное определение в системе СВРК подогрева теплоносителя по петлям 1-го контура и основного контролируемого оперативным персоналом параметра - средневзвешенной мощности реактора.

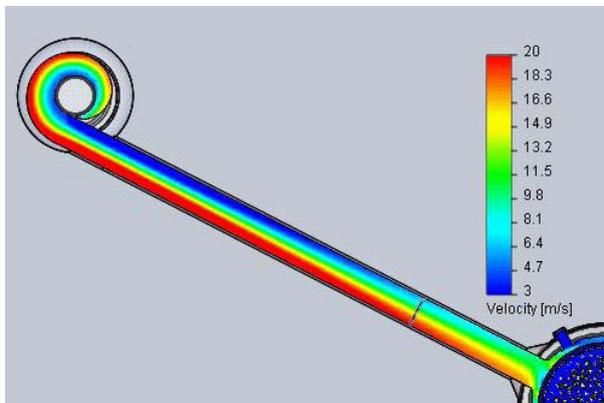
Несмотря на то, что о стратификации теплоносителя стало известно фактически с момента ввода первых энергоблоков проекта В-320, систематизированный анализ с целью выявления зависимостей и закономерностей практически не проводился. В ходе эксплуатации энергоблоков №2 и №3 Южноукраинской АЭС, а также по результатам испытаний при вводе в эксплуатацию последних энергоблоков Калининской, Ростовской АЭС [2], получены данные, свидетельствующие о том, что стратификация увеличивается с увеличением уровня мощности и зависит от радиального распределения энерговыделения в активной зоне. С целью изучения возможных факторов, влияющих на стратификацию, выполнен анализ опытных и расчетных данных по температурам теплоносителя на выходе из активной зоны реактора в "горячих" нитках петель 1-го контура.

Эффект стратификации и перемешивания в "холодной" нитке ГЦТ. При симметричной работе главных циркуляционных насосов (ГЦН) реактора ВВЭР-1000 с РУ В-320 теплоноситель одной петли, в основном, остается в пределах сектора своей петли, но, при этом, наблюдается некоторое смещение в сторону против часовой стрелки [3]. Причиной этого смещения является существенная поперечная неравномерность профиля скорости теплоносителя на выходе из ГЦН, которая сохраняется до входа в реактор. Для определения этого смещения и выявления его особенностей для энергоблоков №3 (В-320) и №2 (В-338) проведен детальный расчет течения теплоносителя от ГЦН, в опускном участке и до входа в перфорацию шахты реактора.

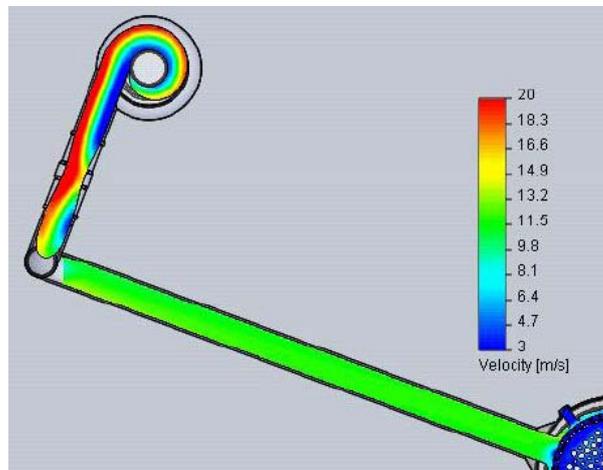
Для расчетов распределения поля скоростей и температур в ГЦТ использован компьютерный код SolidWorks Flow Simulation (COSMOSFloWorks). При анализе течения теплоносителя в опускном участке реактора детально рассматривался участок ГЦТ от улитки ГЦН до входа в активную зону.

На Рис. 1 и Рис. 2 представлен профиль скорости теплоносителя, в сечении

трубопроводов "холодных" ниток энергоблоков №3 (В-320) и №2 (В-338). Как видно, существенная неравномерность профиля скорости на выходе из ГЦН в трубопроводе реактора энергоблока №3 сохраняется вплоть до входа в реактор. В то время как для энергоблока №2, после двух поворотов потока на 90° неравномерность профиля скорости на выходе из ГЦН практически нивелируется.



Энергоблок №3 (В-320)



Энергоблок №2 (В-338)

Рис. 1 Профиль скорости теплоносителя в "холодных" нитках

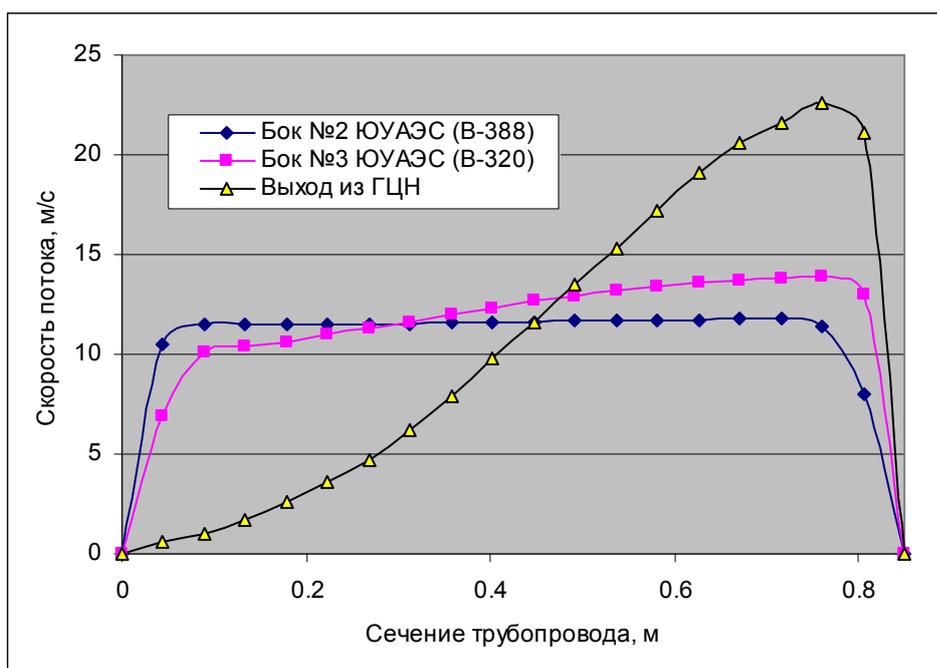


Рис. 2 Профиль скорости в сечении трубопровода

На Рис. 3 представлена траектория движения и зона перемешивания потоков из "холодных" ниток в опускной части и на входе в перфорацию шахты реактора. По рисунку видно, что поворот потока против часовой стрелки для энергоблока №3 составляет 25° - 30°. Для энергоблока №2 поворот потока отсутствует, и теплоноситель каждой петли остается в пределах сектора своей петли. Межпетлевое перемешивание теплоносителя за счет механизма смещения потока в опускной части реактора для энергоблока №2 с РУ В-338 отсутствует.

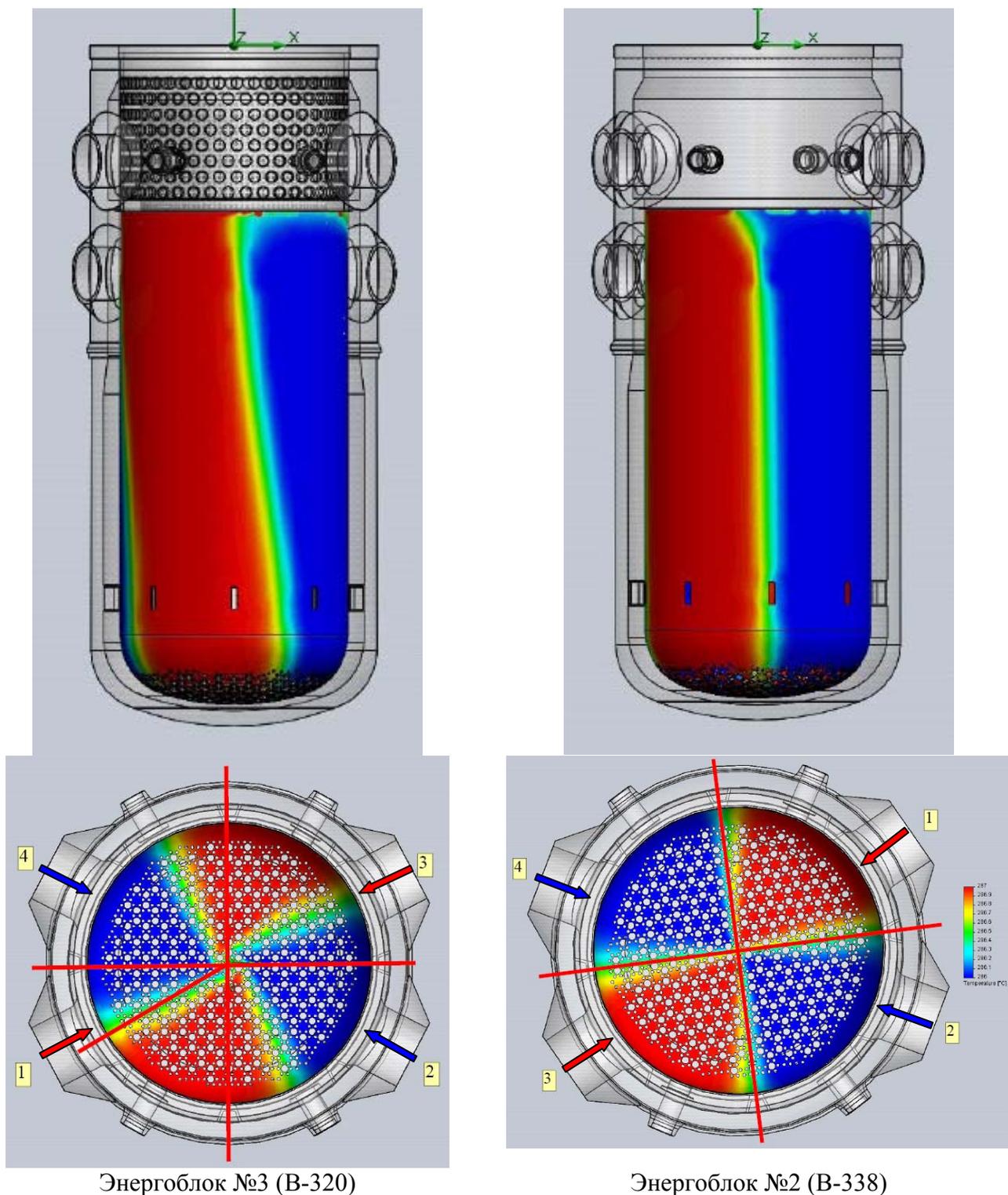


Рис. 3 Распределение и перемешивание потоков из "холодных" ниток в опускной части реактора

Эффект стратификации и перемешивания в «горячей» нитке ГЦТ. Сравнительный анализ конструкции внутрикорпусных устройств (ВКУ) реактора энергоблока №2 (РУ В-338) и реактора энергоблока №3 (РУ В-320) выявил отличие в конструкции шахты реактора и опорных стаканов, которые приводят к снижению КГС входной части реактора и увеличению ширины кольцевого зазора между шахтой и корпусом реактора. Соответственно, энергоблок №2 характеризуется повышенным расходом и увеличенной долей протечек теплоносителя через разделительное кольцо

реактора.

Разделительное кольцо находится в непосредственной близости к выходу теплоносителя из реактора в "горячий" трубопровод, поэтому протечки «холодного» теплоносителя через разделительное кольцо оказывают существенное влияние на неравномерность поля температур в сечении «горячего» трубопровода реактора. Оценки показали, что доля протечек через разделительное кольцо для энергоблока №3 составляет ~0,1%, для энергоблока №2 доля протечек составляет ~1.0%.

Ниже для реактора энергоблока №2 (РУ В-338) приводятся результаты расчетов распределения температур теплоносителя в БЗТ до входа в "горячий" трубопровод реактора и далее распределение температуры по всей его длине до входа в парогенератор.

При расчете распределения температур потока теплоносителя и его перемешивания в «горячем» тракте ГЦТ граничными условиями являлись общеконтурные характеристики реактора. Расход и температура теплоносителя на выходе из ТВС, расходы по петлям и через реактор рассчитывались с использованием программного комплекса СТАРТ [4] на основе состава активной зоны по типам ТВС (107 ТВСА, 14 ТВС-М, 42 ТВС-В) и напорным характеристикам выемных частей ГЦН в 24-ю топливную кампанию энергоблока №2. При этом температура теплоносителя на выходе из ТВС рассчитывалась с учетом того, что температуры теплоносителя на входе ТВС каждой петли остается в пределах сектора своей петли.

В целях уменьшения вычислительного объема расчетов моделировалась только выходная, "горячая" часть ГЦТ, на участке от выхода теплоносителя из активной зоны до входа в парогенератор.

На Рис. 4 представлено расчетное распределение температур в БЗТ реактора энергоблока №2 до входа в "горячий" трубопровод реактора.

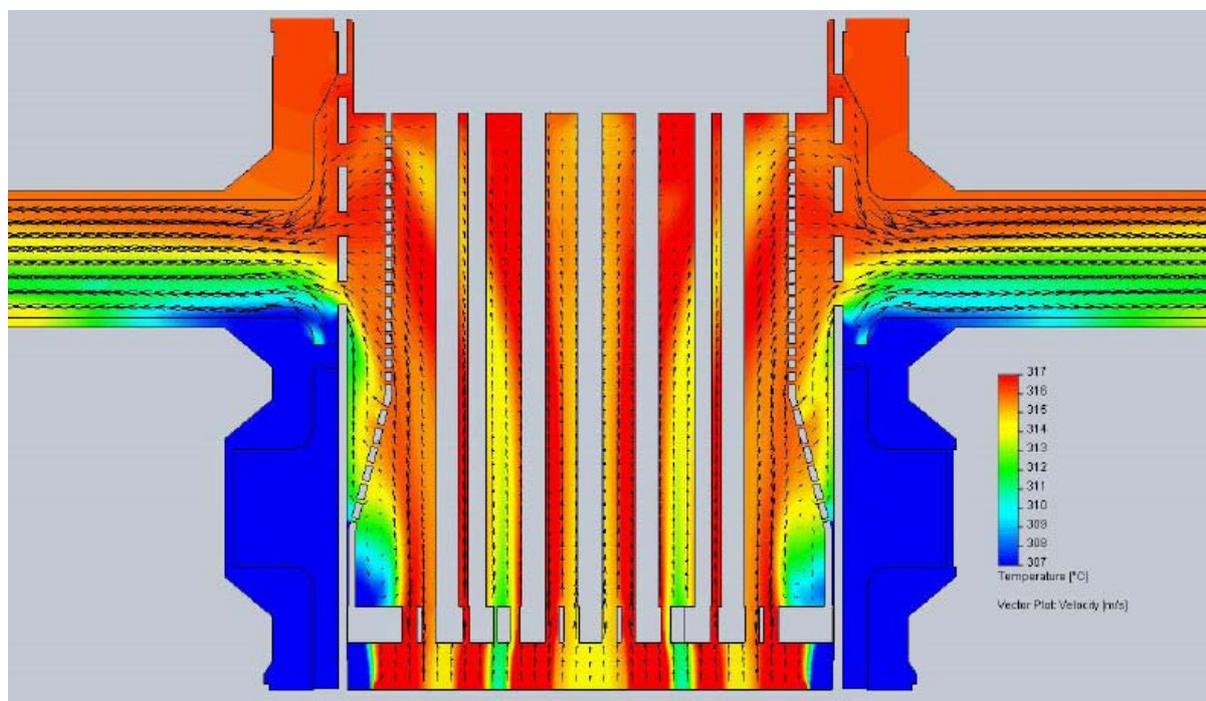


Рис. 4 Распределение температур в БЗТ и выходе из реактора энергоблока №2

Как видно из Рис. 4 «горячие» и относительно «холодные» струи от ТВС из центральной части активной зоны проходят не испытывая значительного перемешивания межтрубное пространство вплоть до перфорации обечайки БЗТ и локализуются в верхней части выходного трубопровода. Теплоноситель периферийного ряда ТВС, протечки «холодного» теплоносителя через выгородку и кольцевой зазор локализуются в нижней

части трубопровода практически не перемешиваясь.

На Рис. 5 - Рис. 6 представлены поля температур непосредственно на выходе из реактора и в сечениях расположения термоприемников. 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 гильзы термоприемников).

Как видно из рисунков на входе в трубопровод образуются две зоны "горячего" и "холодного" теплоносителя локализующихся, соответственно, в верхней и нижней его частях. Теплоноситель от периферийного ряда "холодных" ТВС, протечек теплоносителя через кольцевой зазор, через зазор между периферийным рядом ТВС и выгородкой, локализуются на входе в трубопровод в нижней его части. Теплоноситель от ТВС расположенных в центральной части активной зоны локализуется на входе в трубопровод в верхней его части.

Неравномерность температуры на входе в трубопровод максимальна и составляет $\sim 7,9$ °С в петле 4.

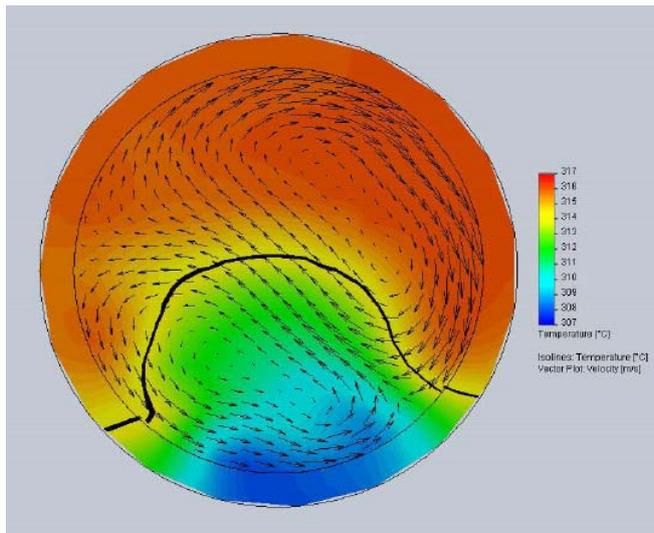
Большая неравномерность температуры на входе в трубопровод реактора энергоблока №2 может быть объяснена большими протечками "холодного" теплоносителя через разделительное кольцо.

При входе теплоносителя в трубопровод происходит его закрутка. Для петель №1 и №3 закрутка потока происходит по часовой стрелке, для петель №2 и №4 - против часовой стрелки (в нумерации петель ЮУ АЭС для энергоблока №2, см. Рис. 3). По мере продвижения потока по трубопроводу происходит его вращение с одновременным перемешиванием и уменьшением неравномерности температур. На расстоянии ~ 7 м от реактора поток теплоносителя разворачивается на ~ 90 и изотермы среднемассовой температуры преимущественно попадают в область установки ТСП расположенного в верхней части трубопровода.

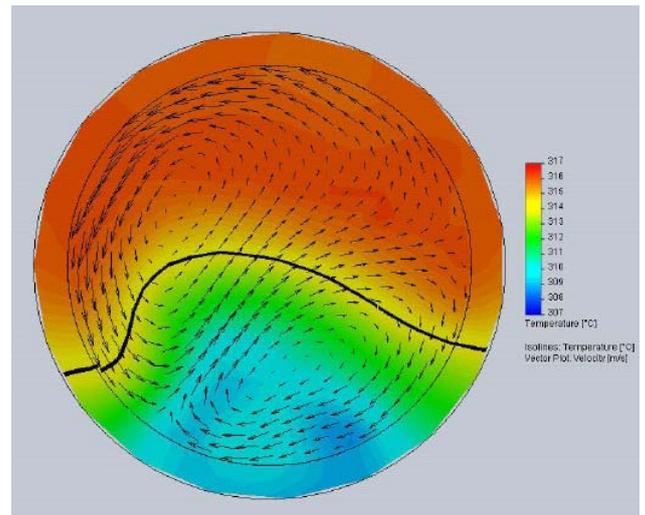
Неравномерность температур в сечениях, удаленных от реактора, сохраняется и составляет $\sim 3,2$ °С в петле №4 реактора энергоблока №2.

Учитывая выше изложенное, с целью получения измеренного распределения температуры теплоносителя по всей длине "горячих" ниток петель 1-го контура, на энергоблоках №1 и №2 ЮУАЭС, проведены работы по выводу на ИВС показаний всех имеющихся в "горячих" нитках петель термодатчиков систем ВРК, АЗ-ПЗ и АРМ-РОМ. На созданном видеокадре ИВС отображает распределение температуры теплоносителя в ГЦТ, как по его длине так и по его диаметру, с учетом глубины погружения гильзы термодатчика. А с целью повышения достоверности измерения температуры этими системами, после каждого ППР, проводятся работы по тарировке термодатчиков этих систем, что позволило измерить распределение температуры теплоносителя по длине и глубине ниток ГЦТ с точностью до 0,5 °С.

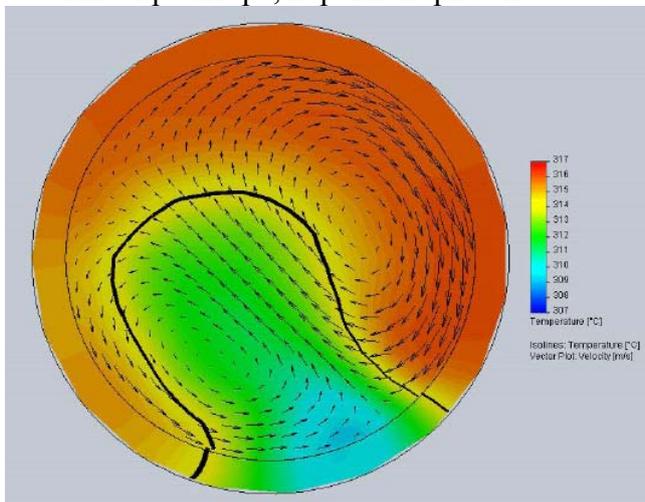
Измерения температуры по всей длине "горячих" ниток ГЦТ подтверждают полученное распределение температуры компьютерным кодом SolidWorks Flow Simulation. На сегодня продолжают работы по сравнению результатов измерений температуры в ГЦТ с расчетными значениями.



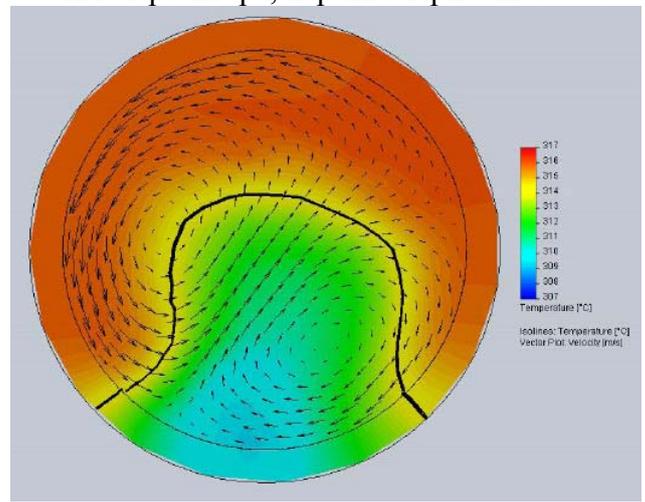
0 мм от реактора, неравномерность 7.4 °С



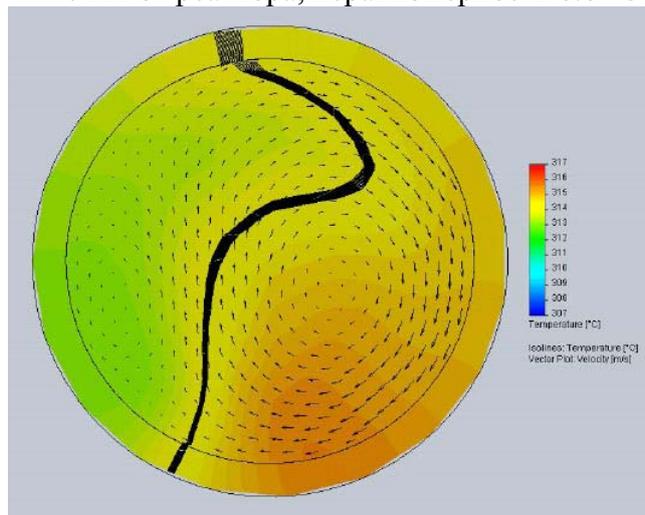
0 мм от реактора, неравномерность 8.3 °С



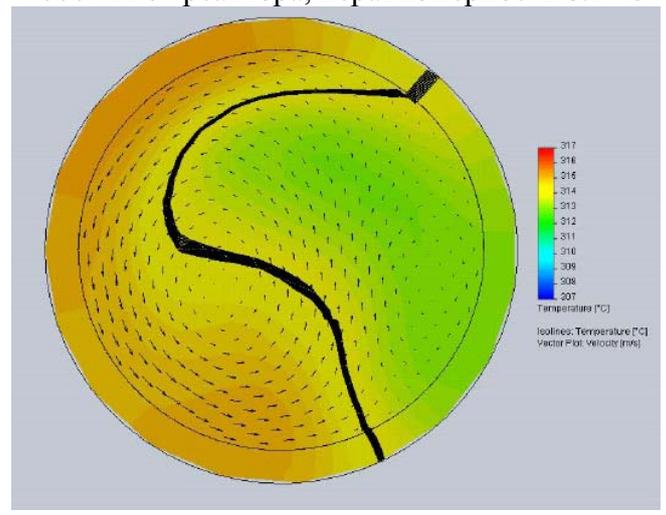
1110 мм от реактора, неравномерность 6.6 °С



1000 мм от реактора, неравномерность 8.1 °С

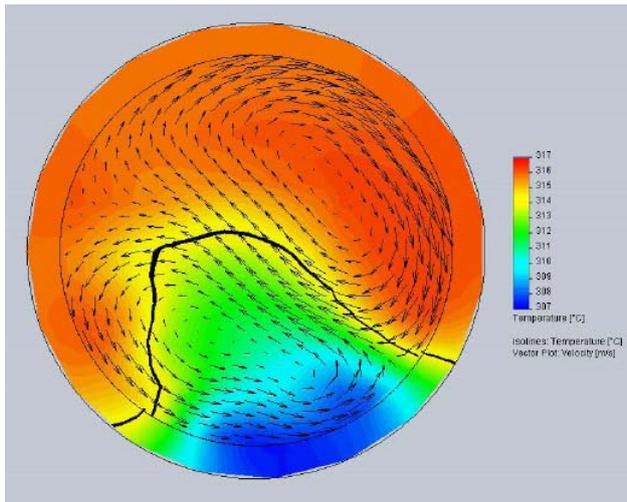


7210 мм от реактора, неравномерность 2.2 °С
Петля №1

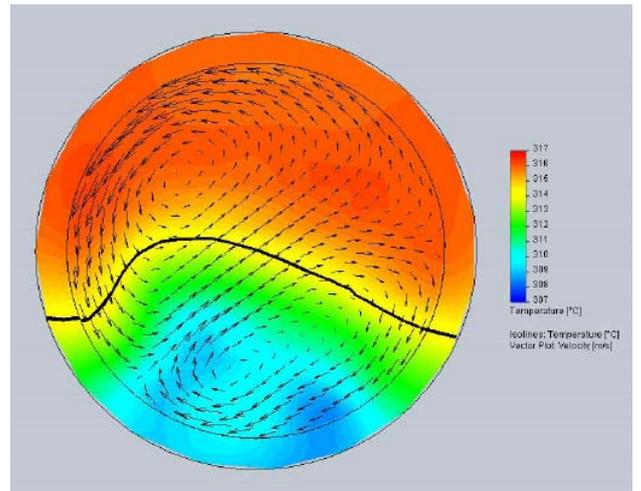


7210 мм от реактора, неравномерность 2.3 °С
Петля №2

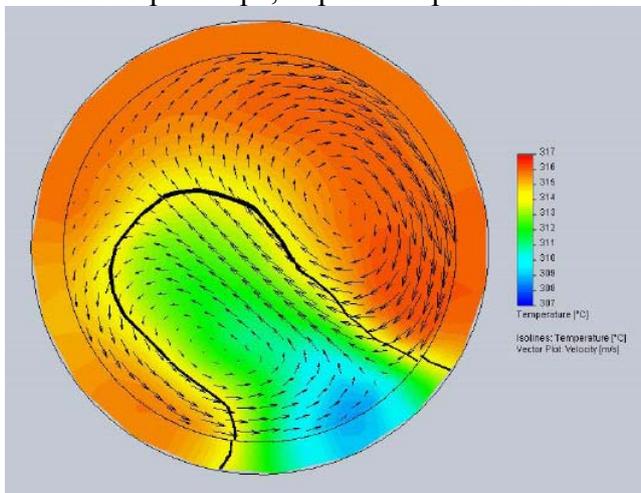
Рис. 5 Поле температур в трубопроводах петель 1 и 2 реактора энергоблока №2



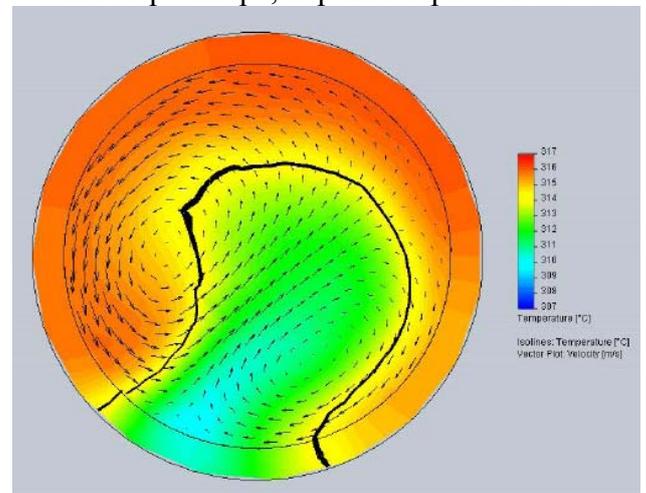
0 мм от реактора, неравномерность 6.7 °С



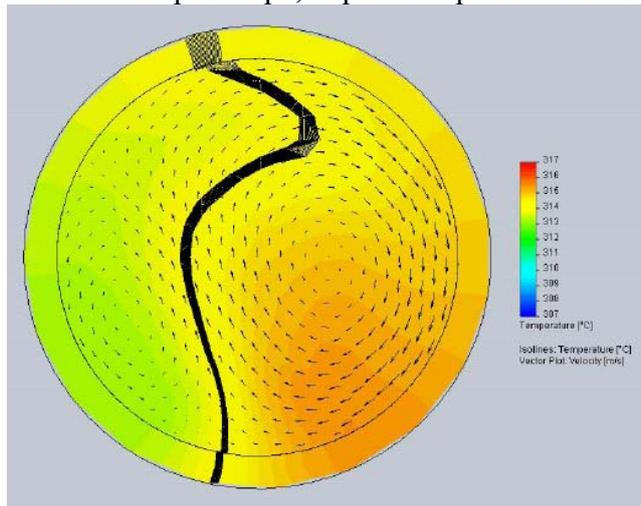
0 мм от реактора, неравномерность 7.9 °С



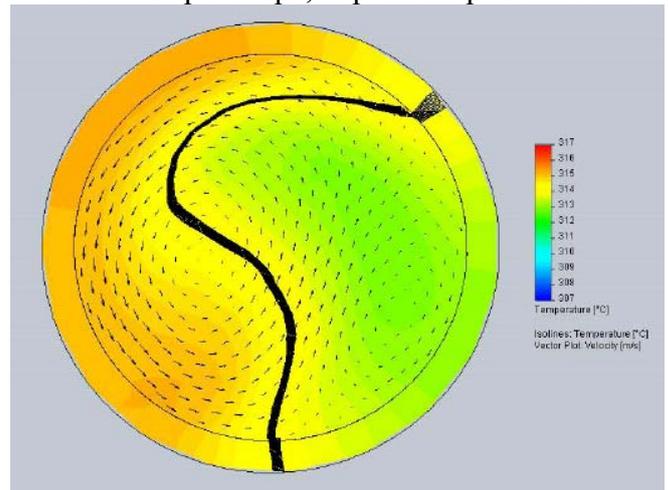
1000 мм от реактора, неравномерность 6.7 °С



2510 мм от реактора, неравномерность 7.1 °С



7210 мм от реактора, неравномерность 1.9 °С
Петля №3



7210 мм от реактора, неравномерность 3.2 °С
Петля №4

Рис. 6 Поле температур в трубопроводах петель 3 и 4 реактора энергоблока №2

Заключение.

Вследствие большей доли протечек "холодного" теплоносителя через разделительное кольцо реактора энергоблока №2 стратификация потока теплоносителя в "горячих" нитках петель 1-го контура наибольшая. Наиболее корректную среднемассовую температуру теплоносителя в "горячих" нитках петель 1-го контура дают ТСП СВРК, максимально удаленные от выхода из реактора и расположенные в верхней части трубопровода.

Для получения достоверной среднемассовой температуры теплоносителя в "горячих" петлях ГЦТ необходимо продолжить работы по возможности применения расчетной температуры компьютерного кода SolidWorks Flow Simulation в сочетании с использованием показаний термодатчиков систем ВРК, АЗ-ПЗ и АРМ-РОМ.

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", Восьмая международная научно-техническая конференция, "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики", Москва, 23-25 мая 2012.
3. 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", Труды 7-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», май 2011 г., Подольск.
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