

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЯНЬВАНЬСКОЙ АЭС

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

Введение

Оценки перемешивания петлевых потоков теплоносителя в реакторах типа ВВЭР необходимы для обоснования безопасности реакторной установки при попадании на вход активной зоны теплоносителя с пониженной концентрацией бора или с пониженной температурой. Для исследования перемешивания теплоносителя с учетом особенностей различных типов реакторов проводятся модельные испытания [1, 2] и соответствующие натурные испытания на этапах ввода энергоблоков в эксплуатацию [3, 4].

Для проектов ВВЭР нового поколения (В-428, В-412, В-446, В-392) и серийных ВВЭР (В-320) после проводимых мероприятий по модернизации систем контроля и управления для повышения номинального уровня мощности натурные испытания, связанные с оценками перемешивания, имеют ещё большее значение. Это связано с включением в состав системы внутриреакторного контроля (СВРК) новых и модернизируемых проектов программно-технических средств обеспечивающих выполнение защитных функций по локальным внутриреакторным параметрам. Повышенные требования к надежности защитных функций определяют соответственно и повышенные требования к информации контролируемых параметров по данным функциям, в том числе к информации о распределении температуры теплоносителя на входе в активную зону. Следует отметить, что новые проекты (В-412, В-392) включают дополнительную пассивную систему быстрого ввода бора, которая предназначена для останова реактора при отказе активной системы управления и защиты. Эффективность работы этой системы также может быть подтверждена по оценкам перемешивания петлевых потоков теплоносителя при натурных испытаниях.

При вводе в эксплуатацию энергоблоков №1 и №2 Тяньваньской АЭС с реакторами ВВЭР-1000 проекта В-428 были выполнены испытания для определения температурного поля теплоносителя на входе в активную зону и по исследованию перемешивания петлевых потоков теплоносителя в корпусе реактора. Данные испытания проводились на основании разных методик, позволяющих достигнуть значимых различий в температурах холодных ниток петель первого контура. По результатам выполненных натурных испытаний были определены коэффициенты межпетлевого перемешивания и коэффициенты влияния температур холодных ниток петель на температуры на входе в тепловыделяющие сборки (ТВС).

В настоящей работе представляются и сравниваются данные по перемешиванию петлевых потоков и распределению температур на входе в активную зону на энергоблоках №1 и №2 Тяньваньской АЭС. Основной целью проведения сравнительного анализа являлась оценка возможности применения результатов испытаний, полученных на головном энергоблоке, на пускаемых далее серийных энергоблоках. На основании проведенного анализа даются конкретные рекомендации по возможной оптимизации количества испытаний при вводе в эксплуатацию головных и серийных энергоблоков. Выполненная работа и приводимые результаты натурных испытаний могут представлять интерес для отработки методик подобных испытаний, а также для верификации и применения моделей перемешивания теплоносителя в корпусе.

Описание проведенных испытаний и выполненного анализа

Как было выше указано, испытания по исследованию перемешивания петлевых потоков выполняются для расчета коэффициентов межпетлевого перемешивания. Данные коэффициенты определяют перемешивание на пути следования потока от входных патрубков до выходных или доли теплоносителя уходящего из петли в другие петли [2]. По методике данных испытаний значимые различия в температурах теплоносителя холодных ниток петель 1 контура получают на уровне мощности реактора не более 10% от номинальной мощности за счет повышения давления пара в одном из парогенераторов (ПГ) при прекращении отвода пара из этого ПГ. Вследствие этого происходит рост температуры в петле с отключенным ПГ. Разница температуры между петлями зависит от мощности активной зоны и характера перемешивания петлевых потоков.

Основной целью испытаний по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону является получение таблиц коэффициентов влияния температуры теплоносителя в холодных нитках петель 1 контура на температуры теплоносителя на входе в ТВС. Под указанными коэффициентами понимаются коэффициенты перемешивания на пути следования потока от входных патрубков до входа в активную зону или доли теплоносителя уходящего из петли в массу теплоносителя на входе в конкретную ТВС [4]. В отличие от методики испытаний по исследованию перемешивания петлевых потоков, по методике данных испытаний значимые различия получают в "горячем" состоянии реакторной установки (РУ), т.е. на этапах холодно-горячей обкатки или физического пуска. Разница температур теплоносителя в холодных нитках достигается за счет снижения давления путем отбора пара от одного из ПГ и соответствующего расхолаживания 1 контура с максимально допустимой скоростью при отключенных остальных ПГ.

При вводе в эксплуатацию энергоблока №1 Тяньваньской АЭС в соответствии с этапными программами были проведены испытания по исследованию перемешивания петлевых потоков и испытания по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону. Объем испытаний по исследованию перемешивания петлевых потоков включил состояния с повышением давления в ПГ-1 и ПГ-2 в режиме работы РУ со всеми включенными ГЦН. Объем испытаний по определению температурного поля включил состояния с расхолаживаниями через каждый парогенератор в режиме работы РУ со всеми включенными ГЦН и состояния расхолаживания через работающие петли при всех комбинациях режимов работы РУ с тремя работающими ГЦН.

При вводе в эксплуатацию энергоблока №2 Тяньваньской АЭС в соответствии с этапными программами были проведены только испытания по определению температурного поля. При этом объем испытаний включил состояния только с расхолаживаниями через каждый парогенератор в режиме работы РУ со всеми включенными ГЦН.

Если испытания по исследованию перемешивания петлевых потоков проводились как "традиционные" при вводе в эксплуатацию головного энергоблока, то испытания по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону при вводе в эксплуатацию энергоблоков с ВВЭР-1000 проводились впервые. Поэтому объем этих испытаний для двух энергоблоков был определен фактически на основании априорного требования о безусловной необходимости получения таблиц коэффициентов для основного технологического режима со всеми работающими ГЦН на каждом из энергоблоков. Таблицы коэффициентов для режимов работы с тремя работающими ГЦН предполагались как дополнительные только на головном энергоблоке с их последующим возможным распространением на второй энергоблок после сравнения таблиц для основного режима. Такое решение было принято исходя из проектной идентичности энергоблоков, маловероятной работы в данных режимах в течение длительного времени, а также исходя из экономических соображений ввиду существенных временных затрат и достаточной трудоемкости процедур выполнения испытаний.

Для обработки результатов испытаний использовалась программа "Термополе" [5] из специализированного программного обеспечения для комплексных испытаний СВРК [6]. В ходе анализа проводилось:

1. Сравнение характера температурных полей теплоносителя на входе в активную зону (коэффициентов влияния) двух энергоблоков в одинаковых режимах работы РУ;
2. Оценка углового поворота потоков в реакторе;
3. Оценка ошибки восстановления температуры и максимального отклонения от измеренной температуры при разных подходах к расчету коэффициентов влияния;
4. Сравнение коэффициентов межпетлевого перемешивания петлевых потоков двух энергоблоков.

При анализе принималось во внимание, что результаты были получены на двух идентичных энергоблоках, расположенных географически в одном месте, при одинаковых состояниях одним и тем же персоналом по одинаковым методикам.

Результаты сравнительного анализа и их обсуждение

1. Характер распределения температурных полей на входе в активную зону первого и второго энергоблоков представляют картограммы распределения коэффициентов влияния петель на температуры на входе в активную зону. Например, на рис. 1 приведены картограммы распределения коэффициентов влияния первой петли для первого и второго энергоблоков в режиме работы РУ со всеми включенными ГЦН.

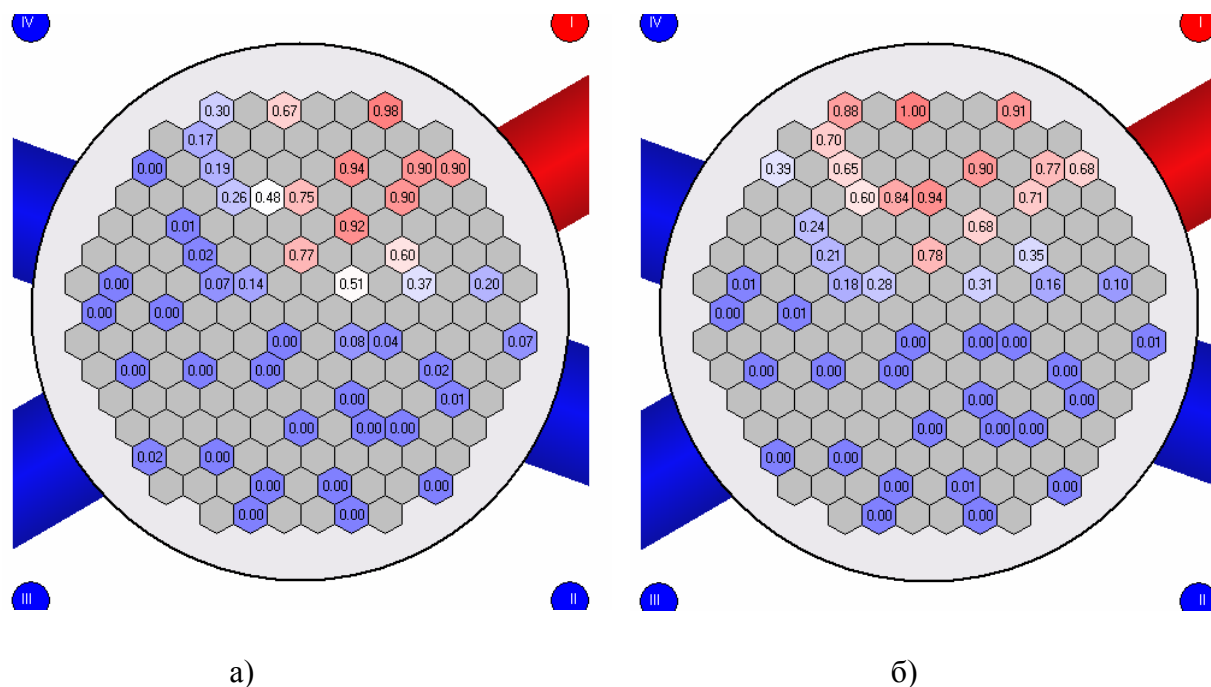


Рис. 1. Картограммы распределения коэффициентов влияния первой петли на температуры на входе в активную зону первого (а) и второго (б) энергоблоков в режиме работы РУ со всеми включенными ГЦН

Принципиальный характер распределения коэффициентов влияния аналогичен и для остальных петель обоих блоков. Можно сказать, что основной поток теплоносителя попадает в свой сектор на входе в активную зону с некоторым угловым поворотом против часовой стрелки, который имеет большее значение при большем угле между смежными петлями в сторону смещения (петля 1 и петля 3).

2. Количественная оценка угла поворота приведена в таблице 1, где представлены углы поворота "центра масс" потока относительно оси соответствующей петли. Для определения координат "центра масс" потока в активной зоне ($X_{цм}$, $Y_{цм}$) использовались формулы:

$$X_{цм} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (1)$$

$$Y_{цм} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (2)$$

где: x_i , y_i , k_i – координаты i -той ТВС в активной зоне и коэффициент влияния для этой ТВС от рассматриваемой петли; n – количество ТВС с контролем температуры по показаниям термопар на входе в ТВС.

Таблица 1

Углы поворотов потоков петель на входе в активную зону

Номер петли	Угол поворота, град	
	Энергоблок №1	Энергоблок №2
1	-30	-50
2	2	-15
3	-35	-40
4	2	-15

Как видно из представленной таблицы при более точном рассмотрении углы поворота имеют существенную разницу, что может играть большую роль при определении температур соседних ТВС при возможном распространении коэффициентов с головного блока на последующие серийные блоки. Можно предположить, что на различие угла поворота влияет различие в соотношениях петлевых расходов. В таблице 2 приведены данные по расходам петель в относительных единицах от суммарного расхода через реактор.

Таблица 2.

Расходы теплоносителя в петлях первого контура

Номер петли	Расход теплоносителя, отн. ед.	
	Энергоблок №1	Энергоблок №1
1	0.246	0.247
2	0.250	0.248
3	0.253	0.252
4	0.250	0.253

Из представленных данных следует, что разница в относительных расходах по петлям не превышает 2%. Следовательно, соотношение расходов, очевидно, не может играть определяющую роль для величины угла поворота. В настоящее время по вопросу особенностей протекания потоков теплоносителя имеется ряд публикаций, например [7, 8, 9], но имеющиеся в них сведения не дают однозначного объяснения и формализации наблюдающихся распределений для практического применения в системах контроля и управления при эксплуатации.

3. При эксплуатации реакторов ВВЭР-1000 в штатных СВРК существует два основных способа для определения температуры на входе в ТВС по температурам в холодных нитках:

1) Температура на входе в активную зону считается одинаковой для всех ТВС (T_j) рассчитывается как среднее арифметическое температур холодных ниток:

$$T_j = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (3)$$

где: T_i – достоверная температура в холодной нитке i -ой петли; n – количество петель с достоверной температурой в холодных нитках

2) Температура на входе каждой ТВС рассчитывается индивидуально по соответствующим коэффициентам влияния (весовым коэффициентам) температур холодных ниток:

$$T_j = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot T_i}{\sum_{i=1}^n k_{ij}} \quad (4)$$

где: k_{ij} – коэффициент влияния (весовой коэффициент) холодной нитке i -ой петли на температуру на входе j -ой ТВС.

Как видно при всех $k_{ij}=1$, т.е., когда в случае отсутствия представительной информации влияние петель считается равным, формула (4) будет иметь вид формулы (1). О представительности указанных способов можно судить по анализу данных в режимах с существенной разницей температур в холодных нитках. В таблице 3 даются оценки ошибок расчетов (по отклонениям от измеренных значений) температур на входе в активную зону разными способами при разнице температур в холодных нитках, достигнутой расхолаживанием 1-й петли на 0.9 °С (для энергоблока №1) и 0.5 °С (для энергоблока №2) со всеми работающими ГЦН. На рисунках 2, 3 показаны картограммы отклонений температур, рассчитанных разными способами от измеренных в вышеуказанном режиме. Оценки ошибок расчетов при расхолаживаниях через другие петли дают аналогичные значения. Оценки ошибок расчетов в режимах с тремя работающими ГЦН не приводятся, т.к. на энергоблоке №2 испытания в этих режимах не проводились.

Таблица 3.

Ошибки разных способов расчетов температуры на входе в активную зону

Способ расчета	Средняя квадратичная ошибка, °С	Максимальное отклонение, °С
Расчет по своим весовым коэффициентам	0.01	0.04
Расчет по весовым коэффициентам с другого энергоблока	0.02	-0.5, +0.2 (блок №1) -0.2, +0.5 (блок №2)
Расчет без весовых коэффициентов	0.05	+0.6, -0.6

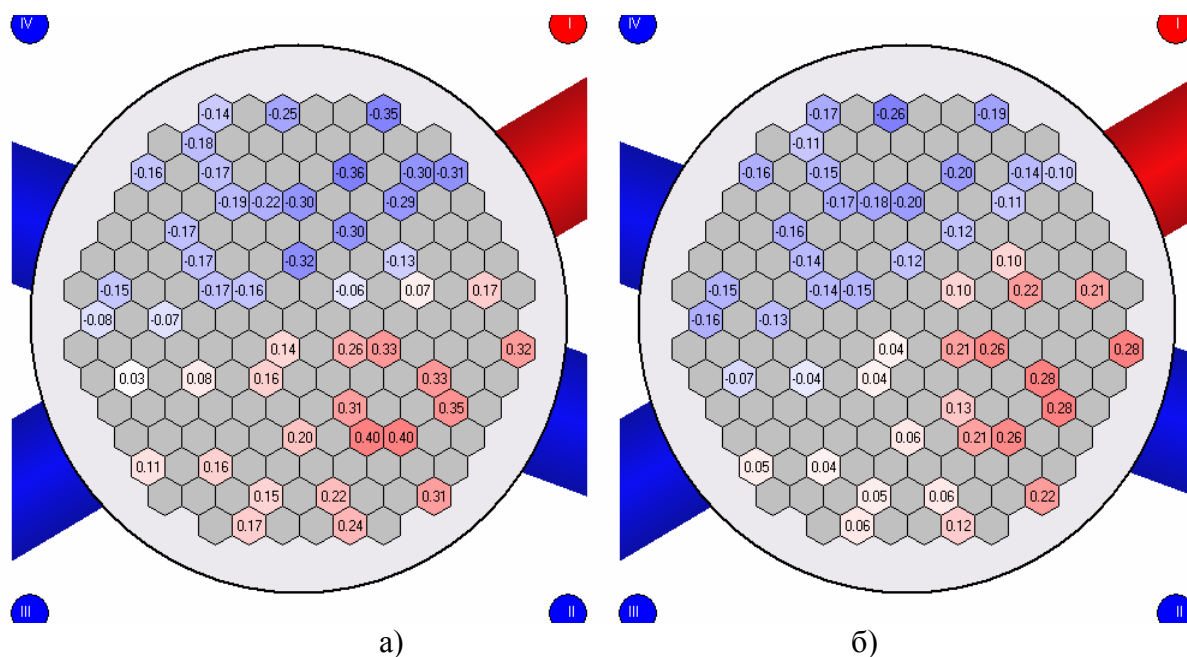


Рис.2 Абсолютные отклонения расчетных температур на входе в ТВС от измеренных температур при $K_{ij}=1$: а) для энергоблока №1; б) для энергоблока №2

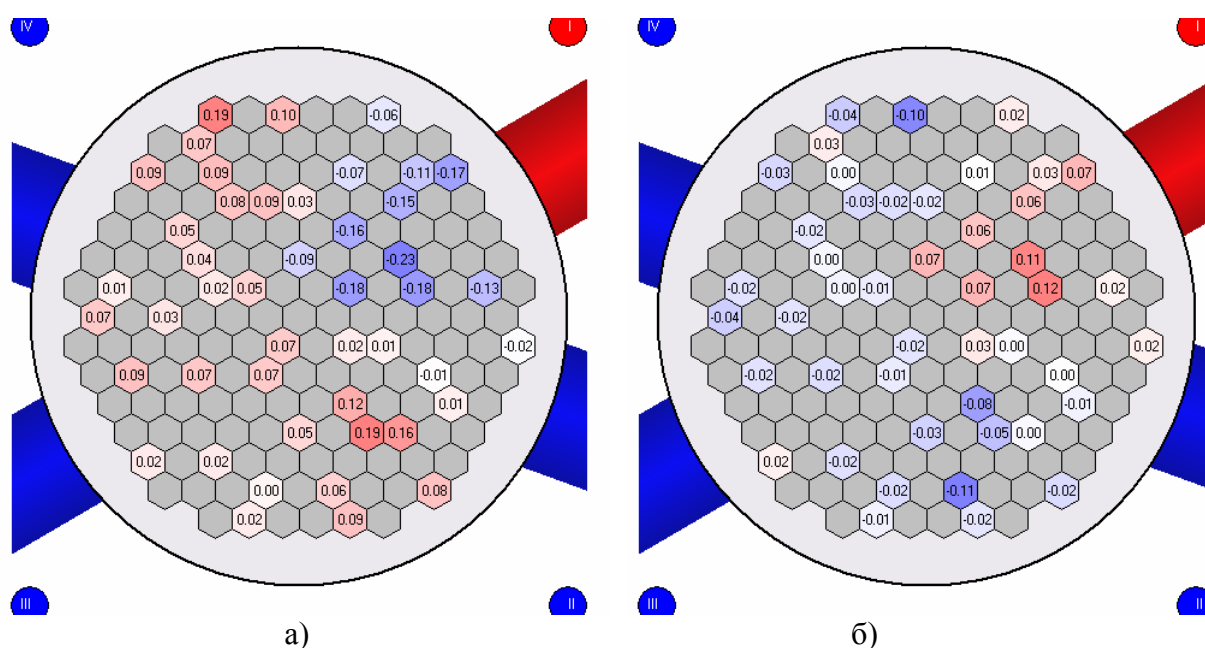


Рис. 3 Абсолютные отклонения расчетных температур на входе в ТВС от измеренных температур при K_{ij} взятых с другого энергоблока: а) для энергоблока №1 с коэффициентами энергоблока №2; б) для энергоблока №2 с коэффициентами энергоблока №1

Как и следовало ожидать, наибольшую погрешность дают расчеты без учета весовых коэффициентов. При этом отклонения расчетной температуры в положительную сторону располагаются в области, где влияние петли мало и, соответственно, отклонения в отрицательную сторону – в области наибольшего влияния петли. При использовании коэффициентов с другого блока наблюдаются взаимно обратные распределения. В местах отрицательных отклонений на энергоблоке №1 наблюдаются положительные отклонения для энергоблока №2 равные по своим величинам (при равном отличии температуры в одной петле).

Коэффициенты межпетлевого перемешивания для двух энергоблоков, полученные по результатам испытаний по определению температурного поля теплоносителя, пред-

ставлены в таблице 4. Данные коэффициенты имеют хорошую сходимость с коэффициентами межпетлевого перемешивания, полученными по результатам испытаний по исследованию межпетлевого перемешивания [4]. Однако, последние не включены в таблицу, т.к. эти испытания, как было указано, были проведены только на энергоблоке №1 и не для всех режимов.

Таблица 4

Коэффициенты межпетлевого перемешивания петлевых потоков

Коэф- фициент	Энергоблок №1				Энергоблок №2			
	В петлю № 1	В петлю № 2	В петлю № 3	В петлю № 4	В петлю № 1	В петлю № 2	В петлю № 3	В петлю № 4
Из петли №1	0.65	0.05	0.01	0.29	0.53	0	0	0.48
Из петли №2	0.28	0.66	0.04	0.02	0.41	0.54	0.03	0.02
Из петли №3	0.01	0.29	0.66	0.04	0.02	0.39	0.59	0.02
Из петли №4	0.06	0.00	0.29	0.65	0.04	0.07	0.38	0.48

По представленным данным по межпетлевому перемешиванию видно, что, как и в случае перемешивания потоков до входа в активную зону, наблюдается соответствие в общем характере перемешивания, но количественные характеристики имеют особенности. Так видно, что доля потока, возвращающегося в нитку с тем же номером, уменьшилась для второго блока, и увеличилась доля потока поступающего в нитку против часовой стрелки. Очевидно, что это связано с большей величиной угла поворота потока относительно оси трубопроводов для энергоблока №2.

Суммируя результаты сравнительного анализа, можно с достаточной определенностью сказать, что наиболее точную оперативную картину характера распределений температур на входе в активную зону может дать система внутриреакторного контроля, которая использует в своей модели объекта контроля данные испытаний, полученные на конкретном энергоблоке. Если брать по опыту эксплуатации предельные случаи различия температур в холодных нитках при режиме работы РУ с полным количеством включенных ГЦН до 3 °С, то максимальные отклонения рассчитанных температур на входе от измеренных могут достигать следующих значений:

- 0.2 °С при использовании своих весовых коэффициентов;
- 2 °С при использовании весовых коэффициентов с другого аналогичного (головного) энергоблока
- 2.5 °С без использования весовых коэффициентов.

Таким образом, с учетом возрастающих требований к безопасности и экономичности эксплуатации энергоблоков АЭС, очевидно, что в штатных СВРК необходимо использовать алгоритмы для определения температур на входе в ТВС с весовыми коэффициентами. В свою очередь, весовые коэффициенты должны рассчитываться по результатам представленных испытаний по определению температурного поля во время ввода энергоблока в эксплуатацию. С учетом хорошей сходимости результатов испытаний по определению температурного поля и исследованию межпетлевого перемешивания, последние испытания могут быть исключены из программ ввода в эксплуатацию и для головных энергоблоков. Вместо данных испытаний возможно расширение испытаний по определению температурного поля включением в их состав режимов с неполным количеством включенных ГЦН. Кроме этого, результаты натурных испытаний по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону представляют опытные данные, которые могут использоваться при обосновании безопасности

РУ в аварийных ситуациях, связанных с разрывом паропроводов или при срабатывании систем аварийного ввода борной кислоты.

Заключение

Представленные результаты анализа испытаний, выполненных при вводе в эксплуатацию энергоблоков №1, 2 Тяньваньской АЭС, показывают, что на энергоблоках, выполненных по одному проекту, наблюдается одинаковый качественный характер перемешивания петлевых потоков по тракту теплоносителя в корпусе реактора. Вместе с тем имеются индивидуальные особенности в количественных показателях. Эти особенности, при современных повышенных требованиях к безопасности и экономичности эксплуатации РУ должны адекватно отражаться штатными системами контроля и управления.

Наиболее представительная информация по распределению температур на входе в активную зону может быть получена на основе алгоритмов, использующих весовые коэффициенты температур холодных ниток. Указанные коэффициенты должны рассчитываться на базе результатов испытаний по определению температурного поля теплоносителя на входе в активную зону, которые, в свою очередь, должны проводиться в обязательном порядке при ПНР во время ввода в эксплуатацию каждого энергоблока. Результаты данных натурных испытаний будут представлять и существенную значимость для обоснования безопасности конкретного энергоблока в ряде аварийных ситуациях, связанных с изменениями реактивности реактора вследствие перераспределения температур и концентрации борной кислоты в петлях первого контура.

Список литературы

- 1 Н. Prasser, G.Grunwald, T.Hohne e.a. Coolant mixing in a PWR: deboration transients, steam line breaks and emergency core cooling injection. Nuclear technology. 2003, v.143, №1, p.37-56.
- 2 Ю.А. Безруков, Ю.Г. Драгунов, С.А. Логвинов, В.Н. Ульяновский. Исследование перемешивания потоков теплоносителя в корпусе ВВЭР. Атомная энергия, 2004, т.96, вып.6, с.432-440.
- 3 С.А. Цимбалов, А.В. Крайко. Температурное поле в теплоносителе на входе в активную зону ВВЭР-440. Там же, 1982, т.52, вып. 5, с. 304-308
- 4 Ю.В. Саунин, А.Н. Добротворский, А.В. Семенихин. Там же, 2007, т.103, вып. 2, с. 93-98
- 5 А.В.Семенихин, А.Н. Добротворский, Ю.В. Саунин. Термополе – программа расчета температурного поля на входе в активную зону реактора типа ВВЭР. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008613982. Федеральная служба Российской Федерации по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам
- 6 Ю.В. Саунин, А.Н. Добротворский, А.В. Семенихин. Разработка и применение специализированного программного обеспечения при проведении комплексных испытаний системы внутриреакторного контроля реакторов ВВЭР. Тяжелое машиностроение. 2008, №11, с.18-22
- 7 В.Г. Крапивцев, В.И. Солонин, И.В. Филимонова. Влияние расхода и температуры теплоносителя на входе в реактор ВВЭР-1000 на характеристики потока перед активной зоной. ISBN 5-7262-0710-6. Научная сессия МИФИ-2007. Том 8.
- 8 О.В. Митрофанова. Модель вихревого диполя. ISBN 5-7262-0555-3. Научная сессия МИФИ-2005. Том 8.
- 9 О.В. Митрофанова. Влияние эффектов закрутки потока на тепломассообмен в ЯЭУ. //Обеспечение безопасности на АЭС с ВВЭР: Сб. тр. 5-й междунар. науч.-техн. конф., Подольск, 29 мая – 1 июня 2007 г. ФГУП ОКБ "Гидропресс", 2007.