

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕКОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ СБОРОК В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

**А.О. Скоморохов, Д.А. Лукьянов**

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*



В статье приведены основные результаты по исследованию влияния возмущений нейтронного поля на показания датчиков запаздывающих нейтронов системы контроля герметичности оболочек реактора БН-600. Существование статистически значимого эффекта при наличии тепловыделяющих сборок, имеющих дефект оболочки типа «прямой контакт топлива с теплоносителем», позволяет использовать метод перекомпенсации для локализации негерметичных сборок на реакторах БН-600 и БН-800.

### ВВЕДЕНИЕ

Метод перекомпенсации нейтронного поля предназначен для определения местоположения тепловыделяющих сборок (ТВС), имеющих дефект оболочки тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ), при котором происходит прямой контакт топлива с теплоносителем [1].

Перекомпенсацией называется изменение плотности нейтронного потока с помощью стержней регулирования реактора при поддержке постоянной полной мощности реактора (интегрального потока нейтронов).

При локальном изменении уровня нейтронного потока изменяется количество образующихся продуктов деления и соответственно выход запаздывающих нейтронов из осколков. Присутствие в теплоносителе осколков деления контролируется датчиками запаздывающих нейтронов (ДЗН), входящими в состав системы контроля герметичности оболочек (КГО). Если в зоне локального изменения нейтронного потока имеются дефектные ТВС и теплоноситель из этой зоны достигает в процессе циркуляции места установки датчика запаздывающих нейтронов, то сигнал этого датчика должен измениться пропорционально изменению нейтронного потока.

Применение метода перекомпенсации для локализации негерметичных ТВС позволяет проводить контроль на работающем реакторе, характеризуется малыми временными затратами на проведение измерений, допускает практически полную автоматизацию, и теоретически позволяет определять координаты дефектов с точностью, вплоть до одной ТВС.

## РЕАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Существуют публикации об успешном применении метода перекомпенсации на зарубежных исследовательских реакторах на быстрых нейтронах [2]. Однако сложность системы, включающей в себя дефектный ТВЭЛ, нейтронное поле, теплоноситель и датчик запаздывающих нейтронов выделяет на первый план прямое экспериментальное исследование, как наиболее достоверный способ проверки применимости метода перекомпенсации для определения местоположения дефектных ТВС в условиях конкретного реактора.

В конце 12-ой микрокампании на реакторе БН-600 произошла разгерметизация нескольких ТВС, и перед остановом был проведен уникальный эксперимент с целью проверки возможности использования метода перекомпенсации [3].

На рис. 1 приведена картограмма активной зоны реактора БН-600. В проведенных экспериментах регистрировались сигналы шести датчиков запаздывающих нейтронов (4А, 4Б, 5А, 5Б, 6А, 6Б), расположенных по периметру активной зоны и относящихся к секторной системе контроля герметичности оболочек (СКГО). Уровень мощности реактора и обороты ГЦН поддерживались во время проведения рассматриваемых экспериментов постоянными.

Исходным режимом будем называть состояние, когда центральный стержень КП-ТК (КП-19) выведен из активной зоны, органы регулирования внутреннего и внешнего кольца находятся в одинаковом положении, а разница в положении внешнего и внутреннего кольца не превышает 20мм по указателю положения.

В процессе выполнения программы было реализовано 12 режимов с внесением возмущений нейтронного поля с помощью КП-ТК внешнего кольца (КП 7,8,...,18).

Присвоим реализованным режимам номера 1, 2,..., 12 в той последовательности, в которой они проводились согласно плану проведения эксперимента (табл.1). Цифра в квадратных скобках на картограмме активной зоны (рис. 1), расположенная между парой КП-ТК, означает, что в соответствующем эксперименте данная пара стержней была расположена на 40 мм выше исходного положения, а противоположная на 40 мм ниже.

Назовем симметричными эксперименты, в которых поле изменялось одной и той же четверкой КП-ТК, но в различном направлении (эксперименты 1–7, 2–8,..., 6–12).

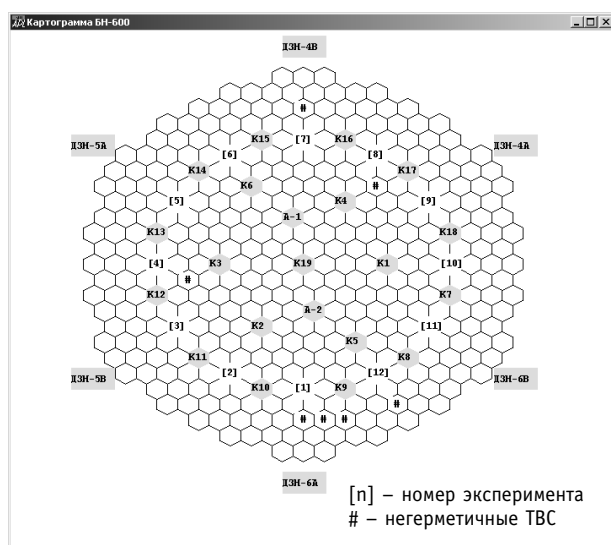


Рис. 1. Картограмма активной зоны реактора БН-600

### Эксперимент

Таблица 1

№	КП-ТК 40мм вверх	КП-ТК 40мм вниз
1	9, 10	15, 16
2	10, 11	16, 17
3	11, 12	17, 18
4	12, 13	18, 7
5	13, 14	7, 8
6	14, 15	8, 9
7	15, 16	9, 10
8	16, 17	10, 11
9	17, 18	11, 12
10	18, 7	12, 13
11	7, 8	13, 14
12	8, 9	14, 15

При сравнении показаний ДЗН для симметричных режимов, эффективная величина возмущения нейтронного поля удваивается, т.к. разность положения стержней КП-ТК для них составляет 80мм.

На рис. 2 для примера представлены схематические диаграммы распределений показаний датчика D6A в шести симметричных экспериментах.

Наиболее сильно отличаются выборки для экспериментов 4–10 и 6–12, что объясняется наличием негерметичных ТВС (обозначены «#» на рис. 1) в районе стержней КП8-КП9 и КП12-КП13, участвовавших в этих перекомпенсациях (см. табл.1).

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

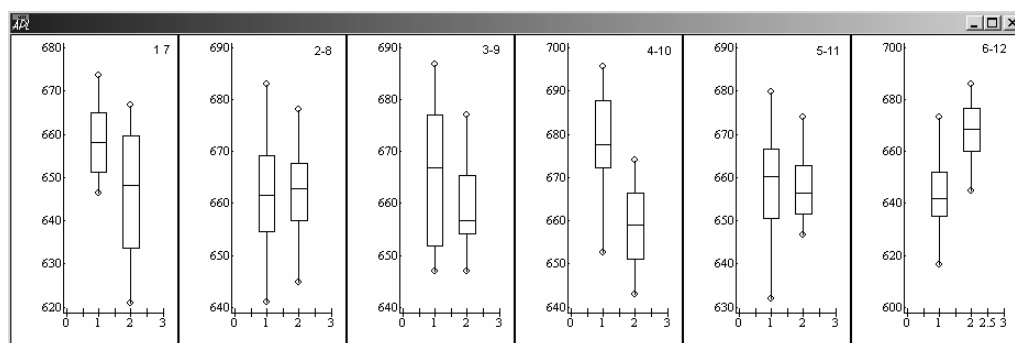


Рис. 2. Схематические диаграммы, датчик D6A

Для проверки статистической значимости эффектов использовался  $t$ -критерий Стьюдента. Возможные отклонения распределения данных от нормального компенсируются тем фактом, что оценки среднего значения случайных величин, имеют приблизительно нормальное распределение[4].

Обозначим  $X$  выборку из  $n$  значений показаний ДЗН в эксперименте  $i$  и  $Y$  – выборку из  $m$  измерений в симметричном эксперименте  $j$ . Нулевая гипотеза  $H_0: \mu_X = \mu_Y$ , где  $\mu_X, \mu_Y$  – математические ожидания случайных величин  $X$  и  $Y$ , проверялась против альтернативной гипотезы  $H_1: \mu_X \neq \mu_Y$ . Гипотеза  $H_0$  была отвергнута для тех экспериментов, для которых абсолютная величина  $t$ -критерия превышает критическое значение.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения  $t$ -критерия, превышающие критические значения, с указанием числа степеней свободы ( $df$ ) и собственно критические значения ( $T_{кр}$ ) для уровня значимости  $\alpha = 0.05$ .

Для парных режимов  $i-j$  район расположения дефектных ТВС при выполнении перечисленных выше условий определялся по правилу: район  $j$ , если  $t > 0$  и район  $i$ , если  $t < 0$ . Действительно,  $t > 0$  имеет место при  $\mu_X > \mu_Y$ , т.к. при движении вверх пары стержней КП-ТК, расположенной в районе  $j$ , сигнал выбранного датчика больше, чем при движении вниз.

Рассмотрим полученные результаты. Прежде всего следует отметить области 1 и 12, в районе которых находятся четыре из семи определенных по результатам исследований, проведенных БАЭС на остановленном реакторе, дефектных ТВС. Таким образом, эксперимент по перекомпенсации позволил идентифицировать наличие дефектов в этом районе.

Два датчика (4А и 5В) подтверждают наличие дефектной ТВС на границе районов 8 и 9. Три датчика (5В, 6А и 6В) указывают на районы 3 и 4, где также на границе имеется дефектная ТВС.

Таблица 2

**Значения  $t$ -статистики для сравнения симметричных режимов**

ДЗН	Симметричные эксперименты (эксперимент $i$ – эксперимент $j$ )					
	1–7	2–8	3–9	4–10	5–11	6–12
D4A		–2.38				
D4B						
D5A						–2.25
D5B	2.33	–1.72	3.22			
D6A	2.97			4.06		–4.14
D6B	3.67		2.26	2.25		–6.73
$df$	30	28	24	24	22	22
$T_{кр}$	1.7	1.7	1.71	1.71	1.72	1.72

Район 7 не зафиксирован, что, по-видимому, объясняется эффектом компенсации сигналов при симметричных экспериментах в случае, когда оба подрайона содержат дефектные ТВС.

Проведем независимую проверку достоверности выводов, сделанных на основе применения  $t$ -критерия с помощью бутстрепа – метода анализа данных, основанного на интенсивном применении компьютера [5].

Применим данный метод для прямой оценки вероятности справедливости гипотезы следующим образом. Для каждого из симметричных экспериментов будем многократно производить равновероятный случайный выбор с возвратом элементов выборок  $X$  и  $Y$ . Полученные наборы назовем  $B$ -выборкой. Поскольку производится выборка с возвратом, то в каждой  $B$ -выборке какие-то из исходных значений встречаются несколько раз, а какие-то не встречаются вообще.

По каждой паре  $B$ -выборок  $X$  и  $Y$  вычисляем разность средних значений  $\Delta = \bar{X} - \bar{Y}$ . Повторив процедуру  $N$  раз, получим выборку:  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$ . Оценим вероятности  $P^+ = \frac{n^+}{N}$  и  $P^- = \frac{n^-}{N}$ , где  $n^+, n^-$  – число случаев, когда  $\Delta > 0$  и  $\Delta < 0$ . Большее значение характеризует степень нарушения гипотезы  $H_0$ .

На рис.3 приведены гистограммы (с нормальной аппроксимацией) для величин  $\Delta$ , вычисленных по  $B$ -выборкам показаний датчика 6А для режимов 1–7 и 2–8. Левая часть рисунка соответствует принятию нулевой гипотезы о равенстве математических ожиданий выборок (отсутствие дефекта). Правое распределение имеет сред-

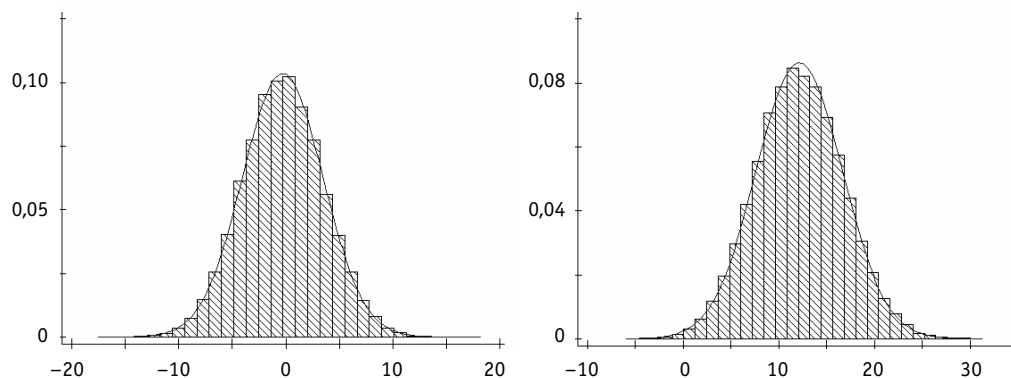


Рис. 3. Распределения бутстреп-статистик, датчик 6А, режимы 1–7 (слева) и 2–8 (справа)

нее порядка 13 ед. и более 99% разностей положительна, что свидетельствует о наличии дефекта в районе КП, участвовавших в экспериментах 2–8.

Район активной зоны считался содержащим дефектные ТВС, если при соответствующих симметричных экспериментах вероятность сдвига в показаниях выбранного датчика СКГО превышала 0.95 (отметим, что такая же доверительная вероятность использовалась при применении  $t$ -критерия).

Оценки вероятностей для количества  $B$ -выборок  $N = 100000$  представлены в табл. 3 (приведены только значения, превышающие 0.95). Знаки плюс или минус после значения вероятности показывают знак изменения сигнала, аналогично табл.2.

Сравнение показывает практически полное качественное совпадение результатов применения  $t$ -критерия и моделирования с помощью бутстреп.

Таблица 3

**Оценки вероятности  
справедливости гипотезы  
при моделировании методом бутстреп**

ДЗН	Симметричные эксперименты (режим $i$ – режим $j$ )					
	1–7	2–8	3–9	4–10	5–11	6–12
D4A		1–				
D4B						
D5A						0.99–
D5B	0.99+	0.96–	1+	0.97+		
D6A	1+			1+		1–
D6B	1+	0.97+	0.99+	0.99+		1–

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, двумя независимыми методами выявлены эффекты изменения уровня сигнала датчиков СКГО при внесении локальных возмущений нейтронного поля в определенных районах активной зоны. Эти районы идентифицированы как содержащие дефектные ТВС.

Результаты идентификации полностью согласуются с перечнем дефектных ТВС, полученным при исследовании, проведенном на остановленном реакторе специалистами БАЭС, что свидетельствует о практической возможности применения метода перекомпенсации для определения местоположения дефектных ТВС в реакторах БН-600 и, в перспективе, БН-800.

## Литература

1. Ломакин С.С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Timm W. Computer program Schiefkast Rechenprogramm Schiefkast. INTERATOM GmbH, Bergisch Gladbach (Germany). IA-54.07594.3. – Germany, 1988.
3. Скоморохов А.О., Лукьянов Д.А. Применение методики перекомпенсации для определения местоположения дефектных ТВС в реакторе БН-600/Безопасность АЭС и подготовка кадров: Тез. докладов. – Обнинск, 2003.
4. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике (пер. с англ.). – М.: Наука, 1977.
5. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. – М.: Финансы и статистика, 1988.

Поступила в редакцию 23.01.2007