

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ТИПА РБМК МЕТОДОМ ТЕРМОСКАНИРОВАНИЯ

А.И. Трофимов, И.А. Чусов, М.А. Трофимов, И.А. Шевцов,
С.П. Пашков, А.Я. Устюжанин, В.В. Максимовский
Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



В работе приводятся результаты экспериментального исследования распределения температуры на внутренней стенке технологического канала. Показано, что метод термосканирования позволяет определить изменение зазора между внешней стенкой технологического канала и графитом по изменению температурных полей на внутренней поверхности технологического канала. Приведены результаты экспериментов с водой и воздухом в качестве теплоносителя, полученные с помощью различных сканирующих устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические каналы (ТК) ядерных реакторов типа РБМК-1000 являются одним из важнейших узлов в конструкции активной зоны (АЗ). Они находятся под практически непрерывным воздействием эксплуатационных факторов, таких как: нейтронный поток, высокая температура, давление, коррозия. Технологический зазор между трубой ТК и графитовой колонной определяет ресурс работы реактора в целом. В проекте РБМК-1000 не предусматривается эксплуатации ТК с выбранным зазором [1]. При выборке зазора происходит защемление ТК, создаются механические напряжения в металле. Таким образом, исследование изменения величины технологического зазора является одной из важнейших задач при продлении срока работы реакторов.

Впервые концепция определения величины технологического зазора методом термосканирования была выдвинута в работе [2], где расчетным и экспериментальным способом показано существование однозначной связи между распределением температуры на внутренней стенке ТК и величиной технологического зазора. В настоящей работе делается попытка показать, что метод термосканирования не только позволяет обнаружить изменение величины зазора, но и ответить на вопрос о пространственной ориентации кольца (определить положение разреза на кольце относительно ТК).

© А.И. Трофимов, И.А. Чусов, М.А. Трофимов, И.А. Шевцов, С.П. Пашков,
А.Я. Устюжанин, В.В. Максимовский, 2000

Реакторному графиту, который обладает достаточно большой теплопроводностью в рамках эксплуатационных условий, присущ достаточно высокий коэффициент анизотропии (реакторный графит является ортотропным материалом). Зависимость коэффициента теплопроводности по осям формования для графита марки ГР-280 по данным [1] приведена в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента теплопроводности по осям формования для графита марки ГР-280

Температура, °С	Теплопроводность графита λ , Вт/(м К)		Коэффициент анизотропии
	параллельно оси формования	перпендикулярно оси формования	
20	120	85	1.41
100	113	80	1.41
200	103	74	1.39
300	93	68	1.37
400	85	64	1.33
500	79	60	1.32
600	73	55	1.33
700	68	51	1.33
800	65	48	1.35

Из табл. 1 следует, что средний расчетный коэффициент анизотропии равен 1,36. Следует ожидать, что у графитовых колец (они тоже выполнены из ГР-280) будет наблюдаться анизотропия по коэффициенту теплопроводности, причем направление осей формования в этом случае является неизвестным. Это обстоятельство также учитывалось при проведении экспериментов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования проводились объединенными усилиями сотрудников проблемной лаборатории кафедры АКид и кафедры теплофизики ОИАТЭ. Общий вид экспериментальной установки с двумя типами сканеров приведен на рис.1 и 2. Экспериментальная установка представляет собой графитовый блок с расположенными по его периметру обогревателями переменного тока. Система нагрева с максимальной мощностью 3,63 кВт, включающая в себя повышающий автотрансформатор РНО-250-10, амперметр типа АСТ, вольтметр АСТВ, трансформатор тока УТТ-5М, позволяла варьировать диапазон рабочих температур блока до 130°С включительно. Обогреватель выполнен из 96 керамических трубок длиной 245 мм, в которые вставлена нихромовая проволока диаметром 1,5 мм. В верхнем торце графитового блока (рис.1) на расстоянии 50 мм друг от друга расположены две хромель-копелевые термодары, предназначенные для контроля равномерности нагрева блока и расчета теплового потока.

Основные измерения проводились при помощи термосканеров двух типов. У первого сканера (рис.1) все датчики располагались в одном поясе с угловым шагом 45°. Прижатие термодатчиков к внутренней стенке технологического канала осуществлялось с помощью пружин. У второго сканера (рис.2) восемь термодатчиков располагались в двух поясах один под другим с угловым шагом 90°. Кроме того, второй сканер был оснащен специальным устройством для подачи теплоносителя непосредственно в область измерения. Подача охлаждающего теп-

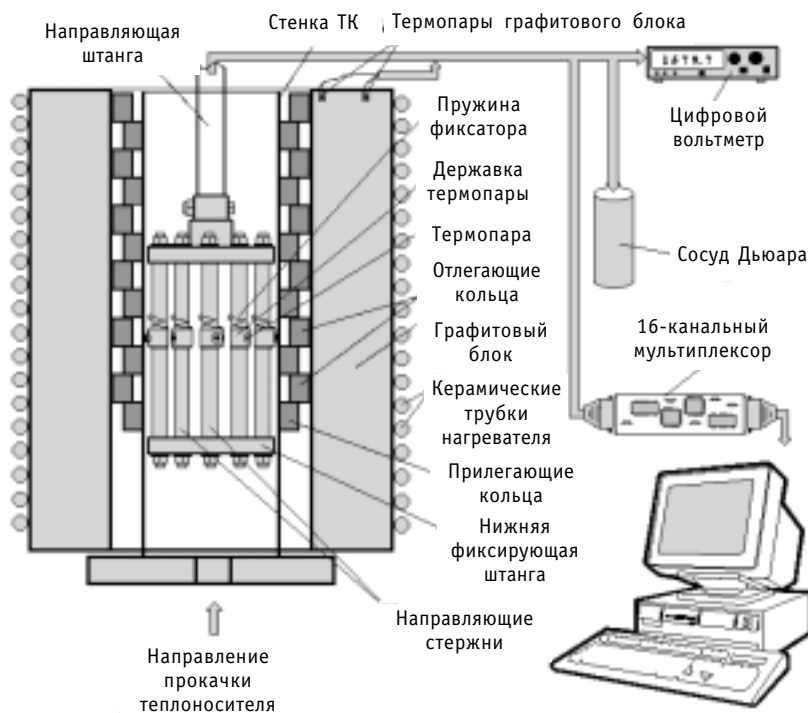


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки с однополюсным сканером (термосканер первого типа) теплоносителя осуществлялась снизу. В качестве теплоносителя при проведении экспериментов использовались воздух и вода.

Эксперименты проводились с датчиками двух типов. Первый тип - термометры сопротивления типа ТСП-50. В этом случае сопряжение первичных датчиков с компьютером осуществлялось с помощью нормирующих усилителей типа ПРИНТ-17.

Сигнал с нормирующих усилителей подавался на 32-канальную 12-разрядную плату PCL-813 с IDE-интерфейсом. Второй тип - хромель-копелевые термопары длиной 500 мм и диаметром спая $\approx 0,5$ мм. В этом случае сопряжение датчиков с компьютером выполнялось по схеме, показанной на рис.1, и осуществлялось посредством 16-канального программируемого мультиплексора-усилителя ACLD-889 фирмы ADClone Inc., который подключался к 24-разрядной параллельной плате ввода/вывода ACL-7124 фирмы ADLink Technology Inc., вставленной в компьютер. Сопряжение платы ввода/вывода с компьютером осуществлялось посредством IDE-интерфейса (на рис.1 и 2 показаны схемы соединения только для случая термопар).

При проведении измерений для обоих типов первичных датчиков использовался независимый канал снятия экспериментальных данных. Для термопар проводилось непосредственное измерение термоэдс с помощью микровольтметра с компенсацией холодных спаев в сосуде Дьюара, а для термометров сопротивления прямое измерение проводилось при помощи потенциометрического метода с использованием потенциометра Р368.

В ходе выполнения экспериментов температура теплоносителей не превышала 90°C .

Для осуществления непрерывного подъема или опускания сканера в верхней части стенда (около 2 м от верхней кромки графитового блока) было смонтировано подъемное устройство со специальным редуктором, позволяющим варьировать скорость подъема/опускания в диапазоне от 1 до 50 мм/с. Для обеспечения

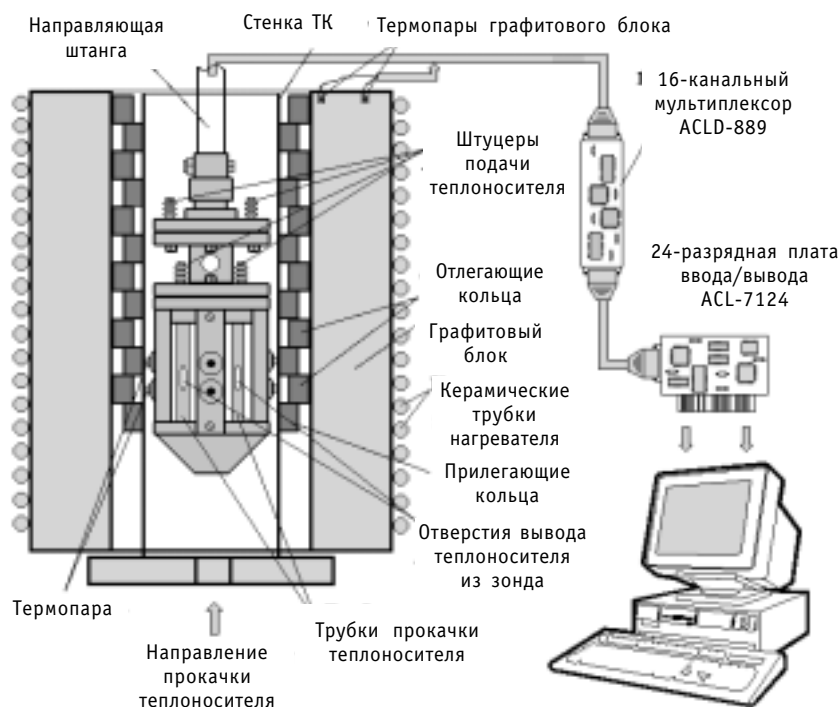


Рис. 2. Общая схема экспериментальной установки с двухпоясным сканером (термосканер второго типа) равномерности движения подъемное устройство оснащено специальным роликом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЗАЗОРА

Экспериментальное моделирование изменения величины газового зазора проводилось в два этапа. На первом этапе в штатный набор графитовых колец было вставлено одно кольцо, у которого был сделан вырез сегмента величиной в 60° . Кроме того, это кольцо было смещено на 2 мм относительно оси канала. Такой подход позволил выполнить моделирование локального повреждения структуры укладки колец.

На рис. 3 и 4 представлено распределение температуры по внутренней стенке ТК. Скорость протяжки термосканера составляла 2,5 мм/с. Термопары обоих поясов зарегистрировали дефект в одном и том же месте. Смещение осей на рис. 3 объясняется тем, что термопары первого и второго поясов смещены относительно друг друга на 2 см и время выхода на ту же точку по высоте графитового блока оказывается разным. Термопары 3 и 7 (расположенные одна под другой) попали в область разреза, в которой температура является наименьшей. Координаты минимума температуры, зафиксированные обеими термопарами, различались между собой на 0,3 мм. Величины температуры, измеренные в этой точке третьей и седьмой термопарами, составили 24 и $23,75^\circ\text{C}$ соответственно. Такой разброс в определении значения температуры является достаточно малым и может быть объяснен собственной погрешностью измерения термопар.

Подъем температуры в областях четвертой и восьмой термопар объясняется прижатием кольца к противоположной стенке графитового блока.

Интересно отметить, что поврежденное кольцо полностью изменяет механизм перетечек тепла, что, в свою очередь, приводит к значительным деформациям поля температур в двух соседних с ним кольцах.

При помощи сканера первого типа было получено пространственное распре-

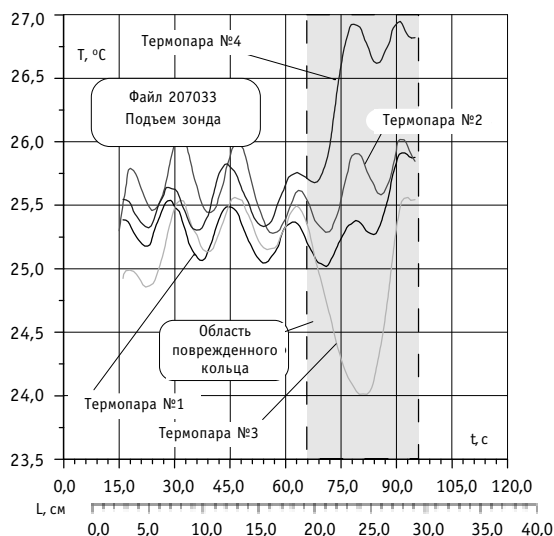


Рис. 3. Распределение температуры по высоте технологического канала; данные первого пояса; эксперимент проводился с термосканером второго типа

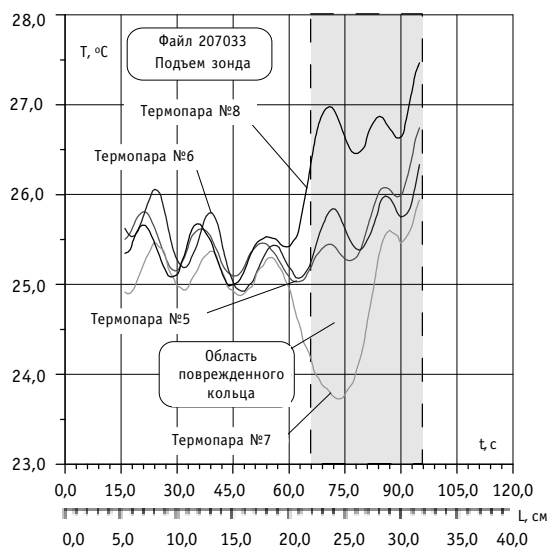


Рис. 4. Распределение температуры по высоте технологического канала; данные второго пояса. Эксперимент проводился с термосканером второго типа

перетечек тепла, вызванного повреждением седьмого кольца. Отметим, что нарушение распределения температур в области пятнадцатого кольца, соседнего с поврежденным четырнадцатым, значительно меньше, чем в области шестого кольца.

На основании полученных данных можно сделать вывод о возможности методами термосканирования обнаружить не только поврежденное кольцо (или группу колец), но и сделать выводы о соосности ТК и графитового блока.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ КОЛЕЦ

Прилегающие и отлегающие кольца имеют разрез, выполняющий роль пружины. Ширина разреза для отлегающих колец составляет 15 мм, а для прилегающих - 10 мм. Площадь контактного теплообмена без учета пружинного разреза состав-

ление поля температур по всей длине рабочей части экспериментального стенда (рис. 5). На этом же рисунке показан набор колец, при котором проводились измерения. При этом канал был смещен относительно оси блока таким образом, чтобы в области первой термопары (показано малое кольцо) все кольца имели непосредственный контакт с блоком (такая ситуация возникает при искривлении ТК). Кольца (с седьмого по четырнадцатое) имели дефект, аналогичный описанному в предыдущем эксперименте. Набор колец также показан на рис.5.

Из рисунка видно, что имеет место значительная деформация поля температур, что однозначно указывает на наличие поврежденных колец. В областях первой, второй и восьмой термопар наблюдается локальное повышение температуры внутренней поверхности ТК. Этот факт может быть объяснен только прижатием колец к внешней стенке ТК. На факт нарушения соосности блока и ТК указывает также значительное локальное падение температуры в области третьей-шестой термопар с 16 по 24 кольцо.

На рис. 6 показаны изотермы на внутренней поверхности ТК. Из этого рисунка видна значительная деформация поля температур в области поврежденных колец. Причем можно заметить сильное искажение в распределении температур в области шестого кольца, что может быть объяснено изменением механизма

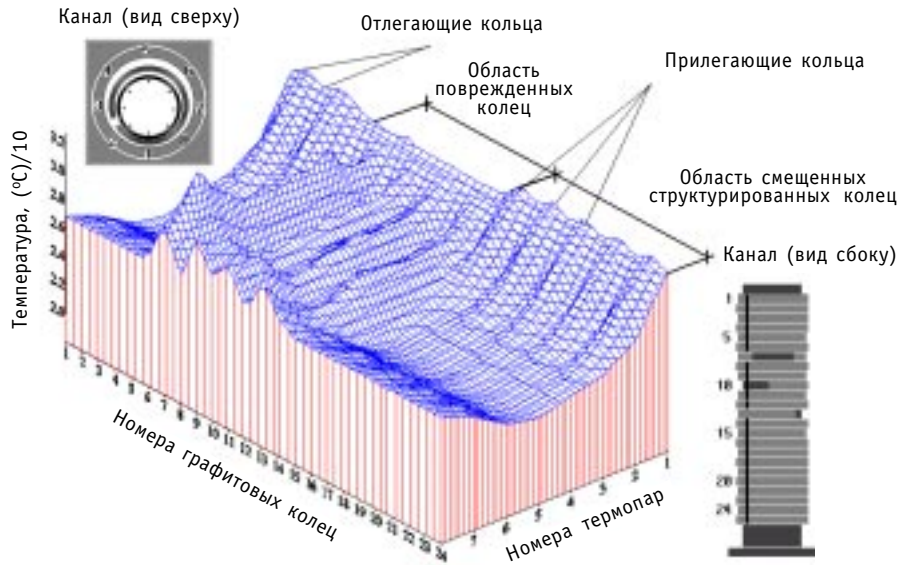


Рис. 5. Распределение температур по окружной составляющей внутренней стенки ТК

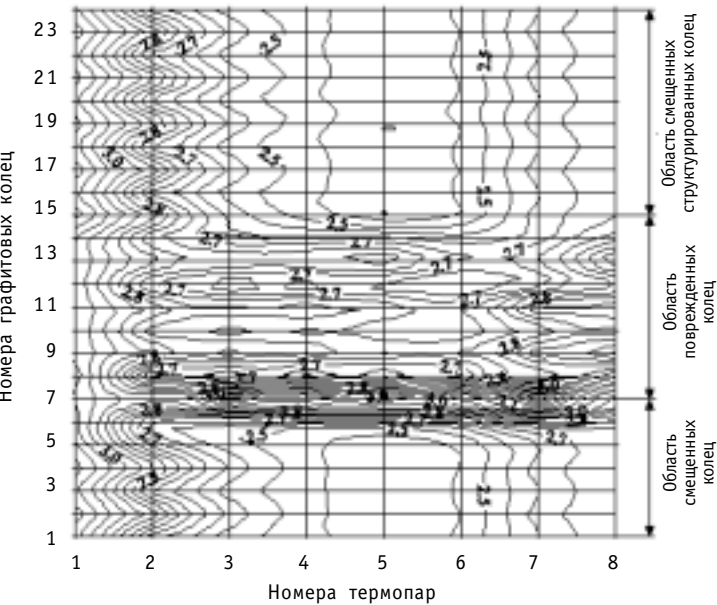


Рис. 6. Изотермы на внутренней поверхности ТК

значения, но и (несмотря на очень малое локальное уменьшение площади контактного теплообмена) определить пространственную ориентацию графитовых колец, т.е. определить положение пружинного разреза конкретного графитового кольца. На рис. 7 показано азимутальное распределение температур по внутренней стенке с увеличенным пружинным разрезом, полученное в ходе выполнения экспериментов.

В первом случае в качестве теплоносителя использовалась вода, а во втором – воздух. Эксперименты проводились с термосканером №1 на отлегающем кольце. Из рисунков видно, что в области увеличенного пружинного разреза имеется локальное падение температуры.

ляет 204,1 и 196,9 см² для отлегающих и прилегающих колец соответственно. Наличие пружинного разреза уменьшает площадь контактного теплообмена на 1,7% для отлегающих и 1,2% для прилегающих колец, которая соответственно равна 200,7 и 194,63 см².

В ходе проведения экспериментов выяснилось, что метод термосканирования позволяет не только обнаруживать отклонение величины газового зазора от штатного

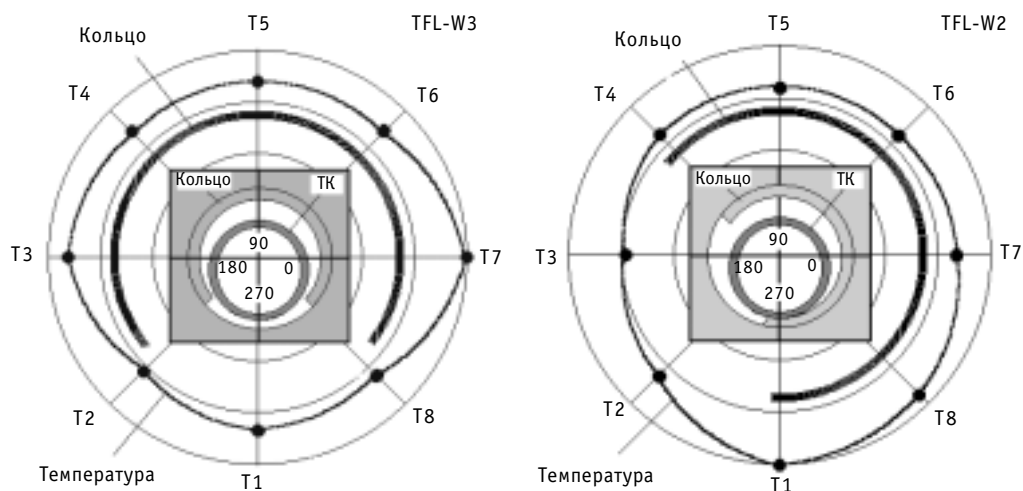


Рис. 7. Распределение температуры по внутренней стенке ТК

Следует отметить, что вследствие радиационного распухания графитовых блоков величина пружинного разреза может уменьшиться (сжатие колец без их механического разрушения [1]), что создает дополнительные трудности в определении его местоположения.

При движении сканера возможны две ситуации:

- пружинный зазор может оказаться в пространстве между термодатчиками;
- термодатчик находится напротив пружинного разреза.

В качестве основного параметра, характеризующего ориентацию кольца, следует принять коэффициент угловой неравномерности, определяемый следующим образом:

$$K = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T(\varphi) d\varphi}{T_{\min}}, \quad (1)$$

где $T(\varphi)$ – азимутальное распределение температур по внутренней поверхности ТК; T_{\min} – минимальная измеренная температура; φ – азимутальный угол. Ясно, что при отсутствии пружинного зазора коэффициент угловой неравномерности будет равен единице.

Нижняя и верхняя оценки для коэффициента K были получены из экспериментов с учетом того, что при проведении капитального ремонта энергоблока температура графитовой кладки не превышает 50°C . Азимутальные распределения температур, полученные с помощью сканера №1, приведены на рис 8.

Нижнюю оценку для коэффициента K можно получить, если расположить сканер таким образом, чтобы пружинный разрез попал между термодатчиками. В ходе проведения экспериментов было выяснено, что отклонение температуры в области пружинного разреза от максимального значения при температуре блока до 100°C остается постоянным и равно примерно 2°C . Аппроксимация распределения температуры возможна, например, с помощью функции

$$T(\varphi) = a + \frac{1}{2}b \left[1 + \operatorname{Erf} \left(\frac{(\varphi - c)}{\sqrt{2d}} \right) \right], \quad (2)$$

где a , b , c , d – эмпирические коэффициенты. Подстановка зависимости (2) в (1) и вычисление интеграла дают $K = 1,01$.

Верхняя оценка может быть получена, если термосканер окажется напротив пружинного разреза (рис.8). В этом случае градиент температуры на соседних термодатчиках не превышает 4°С. Аппроксимирующая функция имеет вид

$$T(\varphi)=a+\frac{1}{4}b\left[1+\operatorname{Erf}\left(\frac{(\varphi-c+d/2)}{\sqrt{2}e}\right)\right]\left[1+\operatorname{Erf}\left(\frac{(\varphi-c-d/2)}{\sqrt{2}f}\right)\right], \tag{3}$$

где a, b, c, d, e, f,– эмпирические коэффициенты. Вычисление интеграла (1) для коэффициента угловой неравномерности К дает значение 1,06.

Таким образом, получаем, что коэффициент угловой неравномерности при штатном расположении колец лежит в диапазоне 1,01≤K≤1,06.

В обоих случаях расположения термодатчиков алгоритм поиска местоположения пружинного разреза включает в себя следующие последовательные шаги:

- аппроксимация азимутального распределения температур какой-либо подходящей функцией;
- расчет коэффициента угловой неравномерности;
- приравнивая аппроксимирующее выражение нулю и выполняя стандартную процедуру поиска минимума функции, находим иско-
мимума функции, находим иско-
значение азимутального угла по-
ложения пружинного разреза.

Отметим, что точность опреде-
ления местоположения пружинного
разреза определяется в значите-
лой степени качеством аппроксима-
ции азимутального распределе-
ния температур.

В табл. 2 приведены некото-
рые результаты расчета местоположе-
ния пружинного зазора в сравнении с
экспериментальными данными.

В случае повреждения графито-

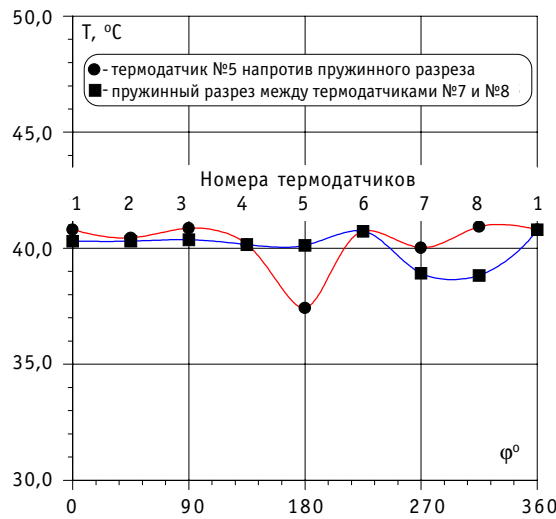


Рис. 8. Распределение температуры по внутренней стенке ТК (пружинный разрез между термодатчиками; напротив термодатчика)

вого кольца или его смещения относительно оси ТК можно применять тот же алгоритм поиска минимума/максимума угловой координаты для определения места прижима или отжима кольца. Если ввести в рассмотрение безразмерную температуру Θ (рис. 9 и 10), обобщающую экспериментальные данные для различных теплоносителей и различных температур графитового блока, нахождение точного значения максимума или минимума температур с учетом местоположения термодатчиков не представляет труда.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ СКАНЕРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При исследовании нестационарных процессов распространения тепла основная погрешность эксперимента связана с инерционностью

Таблица 2
Значение угла φ° местоположения разреза

	Экспериментальное	Расчетное	Относительная ошибка, %
1	44	46.4	5.5
2	97	101,3	4.2
3	124	122	1.6
4	237	242	2.0

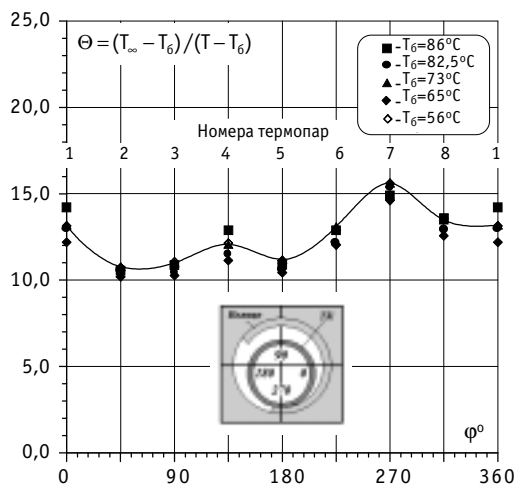


Рис. 9. Распределение безразмерной температуры по внутренней поверхности ТК (опыт с первым типом сканера; рабочее тело - воздух)

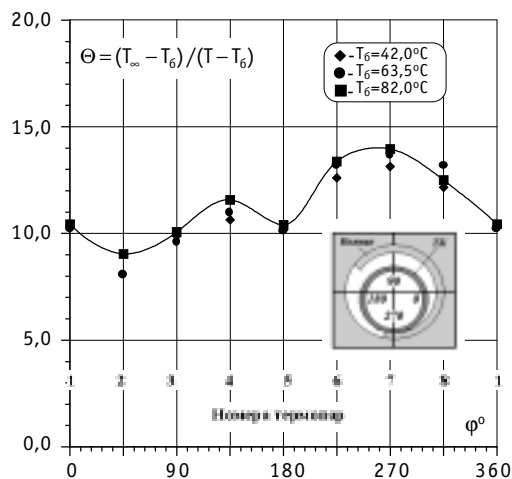


Рис. 10. Распределение безразмерной температуры по внутренней поверхности ТК (опыт с первым типом сканера; рабочее тело - вода)

первичных датчиков измерения температуры. Термопары, как и термометры сопротивления, являются достаточно инерционными приборами и их временная составляющая в зависимости от конкретного технологического исполнения может достигать больших значений. При проведении натурных исследований на реальных энергоблоках термопары и термометры сопротивления должны быть дополнительно защищены, поскольку находятся в условиях значительного остаточного потока ионизирующего излучения, и на них действует сила трения, обусловленная необходимостью плотного прижима датчиков к внутренней стенке ТК. В этом случае следует ожидать, что составляющая времени будет равна примерно с.

Из простых физических соображений следует, что составляющая времени термодатчика $\Delta\tau_T$ связана со скоростью движения сканера следующим соотношением:

$$\Delta\tau_T \leq \frac{d_T}{V_Z} C, \quad (4)$$

где d_T – диаметр рабочей части термодатчика; V_Z – скорость движения термосканера; C – безразмерная константа, учитывающая неплотность контакта между термодатчиком и ТК, отклонение рабочей части от окружности, наличие оксидной пленки на поверхности чехла термодатчика и т.д. При записи этого выражения предполагалось, что температура в области непосредственного контакта рабочей части термодатчика и внутренней поверхности ТК остается постоянной.

Из теории теплопроводности известно, что процесс распространения тепла в субстанции имеет конечную скорость, в то время как при проведении расчетов скорость распространения тепла обычно предполагается бесконечной. С учетом этого соображения выражение (4) следует переписать в виде

$$\Delta\tau_T + \Delta\tau_K \leq \frac{d_T}{V_Z} C, \quad (5)$$

где $\Delta\tau_K$ – время стабилизации температуры.

Из выражений (4) и (5) следует, что для проведения экспериментов по термосканированию с термодатчиками, работающими по принципу прямого контакта с объектом измерения, желательно максимально уменьшить диаметр рабочего элемента.

На рис. 11 и 12 показаны распределения температур, полученные при скорости движения сканера, соответствующей минимальной скорости движения типовой кран-балки, установленной в реакторном зале реакторов типа РБМК-1000. Условия проведения экспериментов были аналогичны приведенным на рис. 3 и 4 кривым. Из сравнения этих графиков можно сделать следующие выводы:

- увеличение скорости движения сканера (это особенно важно при проведении экспериментов на действующих энергоблоках), что значительно снижает временные и дозовые затраты при контроле каналов, приводит к получению полностью непригодных к дальнейшей обработке результатов; как видно из графиков, исключается получение даже качественно верных результатов;

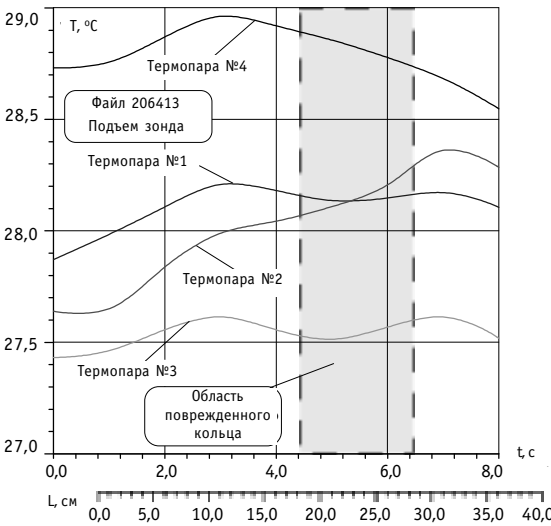


Рис. 11. Распределение температур при ускоренном движении термосканера на первом поясе термопар (опыт с термосканером второго типа)

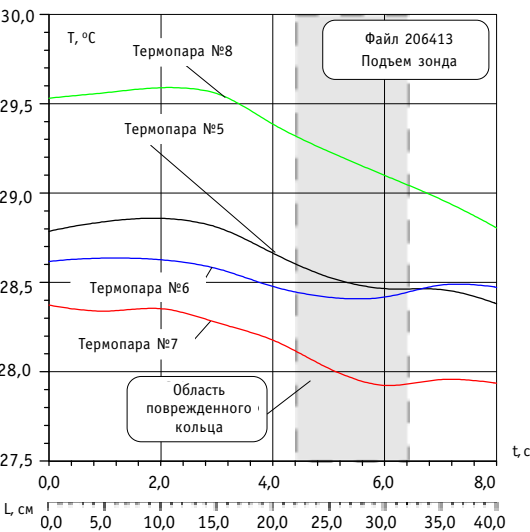


Рис. 12. Распределение температур при ускоренном движении термосканера на втором поясе термопар (опыт с термосканером второго типа)

- получение достоверных данных с большими скоростями движения сканера возможно только в режиме “стоп-движение”, т.е. в режиме с остановкой и выдержкой времени стабилизации температуры;

- для проведения массовых измерений термосканерами рассмотренного типа, для обеспечения движения необходимо использовать специальную лебедку с регулируемой скоростью опускания/подъема.

ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ТЕРМОСКАНИРОВАНИЯ

Результаты проведенных выше лабораторных исследований убедительно показали принципиальную возможность измерения технологического зазора между ТК и графитом методом термосканирования. Однако при промышленной реализации данного метода необходимо учитывать две особенности реальных ТК. Во-первых, внутренняя стенка ТК покрыта оксидной пленкой, которая имеет высокую твердость и срезает поверхность датчиков при их перемещении. Во-вторых, перемещение датчиков производится с высокой скоростью, что исключает применение защитных насадок на поверхности датчиков, т.к. они существенно увеличивают инерционность.

Проведенный анализ датчиков температуры для работы в условиях внутриреакторных измерений показывает, что для решения данной за-

дачи возможно применение бесконтактных тепловых датчиков, принцип действия которых основан на преобразовании теплового излучения контролируемого объекта в электрический сигнал. Этот класс датчиков температуры получил название пирометров излучения. Датчики представляют собой сложные оптико-электрические устройства [3, 4]. Существует несколько типов низкотемпературных пирометров, которые различаются принципом приемника излучения, преобразующего инфракрасное излучение в электрический сигнал. Основным параметром, определяющим применение для внутриреакторных измерений температуры, является радиационная стойкость.

Проведены исследования возможности измерения температуры внутренней стенки ТК с помощью ультразвукового датчика температуры [5], в котором используется эффект изменения скорости ультразвука в чувствительном элементе, контактирующем со стенкой ТК. Однако ультразвуковой датчик температуры также обладает инерционностью. В работе [6] предложен ультразвуковой датчик температуры, в котором в качестве термочувствительного элемента используется непосредственно стенка ТК. Такой датчик практически безынерционен.

На рис. 13 приведена схема конструкции ультразвукового измерительного преобразователя. Он содержит пьезоэлемент 3, демпфер 2, протектор 4 и термочувствительный элемент (волновод) 5, которые помещены в герметичный корпус 1. Термочувствительный элемент выполнен в виде тонкостенного цилиндра 6, заполненного термочувствительными жидкостью или газом. Он может быть выполнен в виде термочувствительного твердого тела – стержня. На конце стержня закреплен наконечник 7, контактирующий с внутренней стенкой ТК, который выполнен из твердого сплава. Для обеспечения надежного механического контакта термочувствительного элемента с внутренней стенкой ТК в термосканере предусмотрено прижимная пружина.

При нагреве волновода возникают явления, обусловленные изменением упругих и неупругих характеристик материала волновода, которые приводят к изменению скорости и поглощению ультразвуковых волн. Повышение температуры в металлах вызывает уменьшение скорости и увеличение затухания ультразвука. Необходимо обеспечивать такой режим работы волновода, при котором он по всей длине имеет примерно одинаковую температуру.

Для повышения чувствительности ультразвукового измерительного преобразователя температуры применяется резонансное возбуждение измерительных преобразователей. Разработан метод возбуждения измерительного преобразователя, в котором все составные части ультразвукового преобразователя представляют собой единую колебательную систему. Для определения резонансной частоты составного ультразвукового преобразователя вводится понятие «акустическая длина», которая связывает скорость ультразвука и длину составных частей ультразвукового измерительного преобразователя температуры: пьезоэлемента $C_{п}, l_{п}$; протектора $C_{пр}, l_{пр}$; волновода $C_{в}, l_{в}$; защитного наконечника $C_{н}, l_{н}$; стенки ТК $C_{ТК}, l_{ТК}$. В этом выражении изменяющимся коэффициентом при изменении температуры

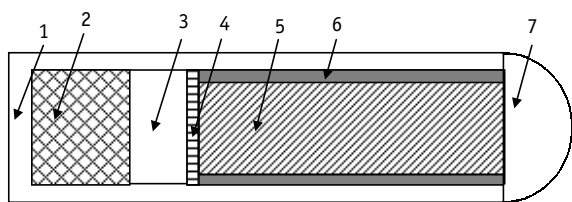


Рис. 13. Ультразвуковой измерительный преобразователь температуры

является скорость ультразвука в волноводе $c_{в}(t)$. Остальные коэффициенты принимаются постоянными.

Для ультразвукового измерительного преобразователя температуры, в котором термочувствительным элементом является вол-

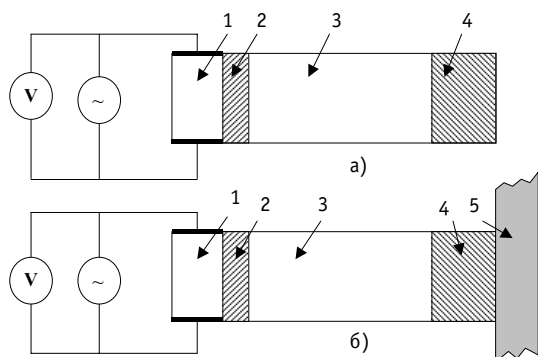


Рис. 14. Схемы ультразвуковых измерительных преобразователей в резонансном режиме колебаний:
 а) термочувствительным элементом является волновод;
 б) термочувствительным элементом является металл ТК;
 1 – пьезоэлемент, 2 – протектор, 3 – волновод,
 4 – наконечник, 5 – стенка технологического канала

новод (рис. 14а), выражение для определения резонансной частоты имеет вид

$$f_p = \frac{1}{2 \left[\frac{\lambda_n}{c_n} + \frac{\lambda_{np}}{c_{np}} + \frac{\lambda_b}{c_b(t)} + \frac{\lambda_h}{c_h} \right]}; \quad (6)$$

если же термочувствительным элементом является металл по толщине стенки ТК (рис. 14б), то

$$f_p = \frac{1}{2 \left[\frac{\lambda_n}{c_n} + \frac{\lambda_{np}}{c_{np}} + \frac{\lambda_b}{c_b} + \frac{\lambda_h}{c_h} + \frac{\lambda_{TK}}{c_{TK}(t)} \right]}. \quad (7)$$

В данном случае изменяющимся

коэффициентом при изменении температуры является скорость ультразвука в стенке ТК $c_{TK}(t)$. Волновод выполняется из материала, скорость ультразвука в котором не изменяется с изменением температуры.

В том и другом преобразователях при изменении температуры стенки ТК изменяется резонансная частота ультразвукового измерительного преобразователя. Если пьезоэлемент включен в частотозадающую цепь автогенератора, выходным сигналом будет изменение частоты колебаний автогенератора.

Таким образом, получены датчики температуры, которые позволяют осуществить промышленную реализацию метода термосканирования.

Литература

1. Белянин Л.А., Лебедев Ю.В. и др. Безопасность АЭС с канальными реакторами. Реконструкция активной зоны. - М.: Энергоатомиздат, 1997.
2. Трофимов А.И., Виноградов С.А., Чусов И.А., Белозеров В.И., Трофимов М.А., А.И. Шевцов И.А. Исследование зависимости температуры стенки технологического канала реактора типа РБМК от величины зазора между ТК и графитовой кладкой // Известия вузов. - Ядерная энергетика. - 1999. - Приложение к №2. - С. 71-81.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1983.
4. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Виноградов С.А., Трофимов М.А. Ультразвуковые термометры в системах диагностики технологических каналов ядерных реакторов типа РБМК: Сб. тр. межд. науч.-практ. конф. «Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». - Ростов-на-Дону, 1999. - С. 199-212.
6. Трофимов М.А. Ультразвуковые термометры в автоматизированных системах контроля состояния технологических каналов ядерных реакторов типа РБМК: Тез. докл. / VI межд. конф. «Безопасность АЭС и подготовка кадров». - Обнинск, 1999. - С. 109.

Поступила в редакцию 10.05.2000

Neutron multiplication coefficients for transuranics in various neutron spectra are calculated. Corresponding neutron cross-section data are taken from the new Russian group data set ABBN-93 in comparison with the national evaluated nuclear data libraries BROND-2, ENDF/B-VI, JEF-2 and Jendl-3. It is shown that in a fission neutron spectrum without any moderation, the most of transuranics have high coefficients of neutron multiplication $K \geq 1$. In the standard fast reactor spectrum with a lead coolant some plutonium isotopes keep their high fissile features while minor actinides, Np-237, Am-241, Am-243 and plutonium isotope Pu-242 are characterized by very low coefficients of neutron multiplication, $K \ll 1$. The ways for incineration of minor actinides in hard neutron spectra are also discussed.

УДК 621.039.7

On Significance of Principle of Radiation Equivalence between Mined Uranium and Radiowastes Buried \A.N. Shmelev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages. – References, 9 titles.

Significance of principle of radiation equivalence between uranium mined and radiowastes buried in study of future large scale nuclear power fuel cycle is analyzed. It is concluded that the role of this principle could be negligible in appropriate fuel cycle.

УДК 621.643.536.24

Efficiency of Heat-Exchange of Transversally Streamlined Pipe Bundles with Different Schemes of Surface Element Location \V.T. Buglaev, A.K. Anisin, A.A. Anisin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 6 titles.

Results of experimental research of heat-aerodynamic characteristics of convective surfaces as pipe bundles of different diameters under change of their orientation angle relatively to coolant flow are given. On the basis of the analysis of the obtained data methods to increase the efficiency of pipe heat-exchange devices are offered.

УДК 51-74:621.039.534

Simulation of Parametric Oscillations in a Cooling System of Nuclear Reactors \K.N. Proskuryakov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages. – References, 3 titles.

The mathematical model of parametric oscillations in the two-phase coolant appearing at periodic elasticity change is developed. The relations for calculation of critical value of modulation of an acoustical compressibility of the two-phase medium when undamped oscillations of pressure and coolant consumption appear.

УДК 621.039.517.5

Experimental Research of Temperature Fields on Inner Surface of Technological Channel of the RBMK-Reactor by Thermoscanning Method \A.I. Trofimov, I.A. Chusov, M.A. Trofimov, I.A. Shevtsov, S.P. Pashkov, V.V. Maksimovskiy, A.Ja. Ustujanin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 12 pages, 14 illustrations, 2 tables. – References, 6 titles.

Results of experimental research of allocation of temperature on inner wall of the technological channel are given. It is shown, that the thermoscanning method allows to define change of clearance between the technological channel and graphite on change of temperature fields on the inner surface of the technological channel. The results of experiments with water and air as the coolant and different types of scanners are given.