

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА РЕАКТОРА РБМК ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ КАНАЛОМ И ГРАФИТОВОЙ КЛАДКОЙ

А.И.Трофимов, С.А.Виноградов, И.А.Чусов, В.И.Белозеров,
М.А.Трофимов, И.А.Шевцов

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск

Р

В работе проводится расчетное и экспериментальное обоснование возможности использования данных по распределению поля температур на внутренней поверхности технологического канала (ТК) для оценки величины газового зазора между ТК и графитовым блоком в реакторе типа РБМК-1000. Численные расчеты с использованием к-ε модели турбулентности показали, что величина газового зазора существенно влияет на распределение температуры по высоте ТК. Экспериментальное исследование с использованием зондов двух типов показало, что нарушение в периодичности укладки разрезных пружинных колец приводит к искажению поля температур как по высоте ТК, так и по радиусу. Делается вывод о возможности экстраполяции величины газового зазора по распределению поля температур.

Одной из основных составляющих обеспечения безопасности энергетических канальных ядерных реакторов является диагностика состояния технологических каналов (ТК). В реакторе РБМК-1000 находится 1700 ТК, изготовленных из сплава цирконий-ниобий, помещенных в ячейки графитовой кладки (рис.1). В зазоре между ТК и графитовой кладкой расположены разрезные пружинные графитовые кольца, часть которых примыкает к ТК (малые кольца), а часть – к стенкам ячейки графитовой кладки (большие кольца). Под действием радиационного облучения и температуры в процессе длительной работы ядерного реактора происходит изменение физических свойств металла и графитовой кладки. Блоки графитовой кладки и ТК претерпевают изменения первоначальных геометрических размеров за счет процессов термодинамической ползучести и радиационного роста. Диаметры ТК увеличиваются, а диаметры отверстий в графитовых блоках уменьшаются. В результате зазор между ТК и графитовой кладкой может уменьшиться вплоть до полного обжатия ТК. Заклинивание ТК в графитовых блоках может вызвать необратимые изменения в системе канал-кладка и существенно сократить ресурс реактора в целом. Величина зазора между ТК и графитовой кладкой – один из основных параметров, определяющих ресурс ТК [1].

© А.И.Трофимов, С.А.Виноградов, И.А.Чусов, В.И.Белозеров, М.А.Трофимов,
И.А.Шевцов, 1999

Ввиду того, что для измерений доступна только внутренняя полость ТК, прямое измерение величины зазора невозможно. Измерение искривления и диаметра ТК дает возможность сделать лишь качественную оценку величины зазора ТК-графит. В настоящее время в проблемной лаборатории ОИАТЭ разрабатывается метод определения зазора ТК-графит, основанный на анализе распределения температур на внутренней стенке ТК.

Предметом настоящей работы является расчетное и экспериментальное исследование в лабораторных условиях поля температур на внутренней стенке ТК, обусловленного заданной геометрией ячейки ТК. Работа производится с целью дальнейшего практического решения обратной задачи - экстраполяции величины зазора на основе анализа значений температуры внутренней стенки ТК.

Предполагается, что распределение температур на внутренней стенке ТК однозначно связано с расположением больших и малых колец, несоосностью ТК и ячейки графитовой кладки и величиной газового зазора. В частности, предполагается, что в области контакта малых колец с внешней стенкой ТК температура должна быть более высокой, чем в местах расположения больших колец, благодаря перетечкам тепла через торцевые поверхности больших и малых колец и непосредственному контакту малых колец со стенкой ТК. На рис.1 стрелками показано направление перетечек тепла в системе большое кольцо - малое кольцо - ТК для случая, когда топливная сборка извлечена из ТК и реактор находится в расхоленном состоянии.

Для проверки правильности исходного предположения был проведен численный анализ процесса нестационарного теплообмена в системе ТК-графитовый блок.

Исходными уравнениями для расчета процесса нестационарного теплообмена являлись уравнение неразрывности, уравнения переноса количества в продольном и поперечном направлениях, уравнение энергии для потока теплоносителя, уравнение теплопроводности. Для определения корреляционных составляющих турбулентного течения теплоносителя использовалась $k-\epsilon$ модель турбулентности (кинетическая энергия турбулентности - скорость ее диссипации) [2] со стандартным набором констант, приведенных в табл.1. Выбор $k-\epsilon$ модели для моделирования турбулентности обусловлен ее апробированностью при расчетах течений такого типа.

Для расчета характеристик турбулентного переноса в пристеночной области использовался метод коррекции расчета с помощью пристеночных функциональных зависимостей, рекомендованных в работе [3].

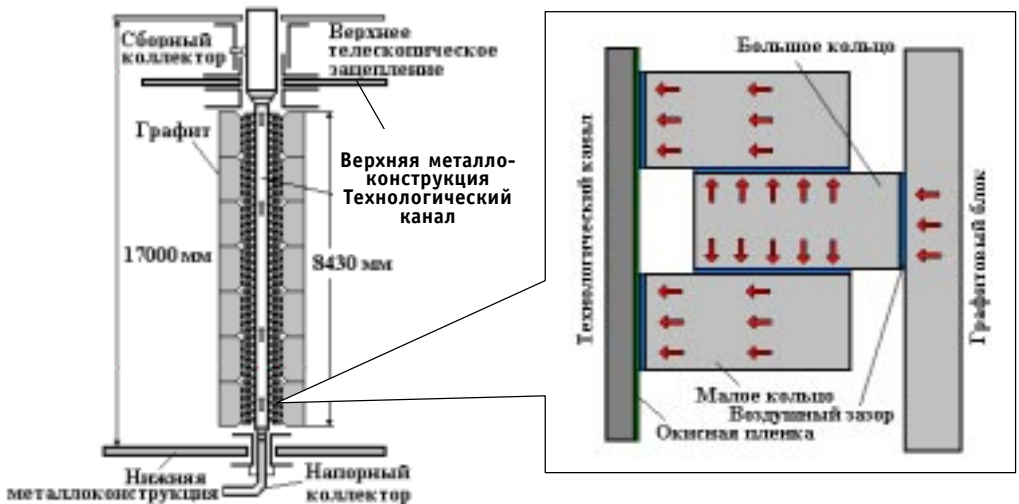


Рис. 1. Технологический канал ядерного реактора РБМК-1000

В цилиндрической системе координат эти уравнения будут иметь вид (уравнение количества движения в продольном (по потоку) направлении, записано с учетом силы плавучести, появляющейся из-за наличия продольного градиента температуры):

$$\frac{\partial}{\partial z}(r\rho U) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho V) = 0, \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial \tau} + \rho U \frac{\partial U}{\partial z} + \rho V \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{\text{Ef}} \frac{\partial U}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{\text{Ef}} \frac{\partial U}{\partial r} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} \pm \rho g \beta \Delta t \quad (2.2)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial \tau} + \rho U \frac{\partial V}{\partial z} + \rho V \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{\text{Ef}} \frac{\partial V}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{\text{Ef}} \frac{\partial V}{\partial r} \right] - \mu_{\text{Ef}} \frac{V}{r^2} - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + \rho U \frac{\partial t}{\partial z} + \rho V \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_{\text{Ef}}}{Pr_t} \frac{\partial t}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r \mu_{\text{Ef}}}{Pr_t} \frac{\partial t}{\partial r} \right] \quad (2.4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial \tau} + \rho U \frac{\partial k}{\partial z} + \rho V \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_{\text{Ef}}}{Pr_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r \mu_{\text{Ef}}}{Pr_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right] + G - \rho \epsilon \quad (2.5)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} + \rho U \frac{\partial \epsilon}{\partial z} + \rho V \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_{\text{Ef}}}{Pr_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r \mu_{\text{Ef}}}{Pr_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right] - \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad (2.6)$$

$$G = \mu_{\text{Ef}} \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{V}{r} \right)^2 \right\} + \left\{ \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial z} \right\}^2 \right] \quad (2.7)$$

$$\mu_{\text{Ef}} = \mu_L + \mu_T = \mu_L + C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (2.8)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \delta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right\}. \quad (2.9)$$

Здесь z, r - продольная и поперечная координаты; λ - коэффициент теплопроводности; ρ - плотность; T - температура; c_p - теплоемкость; τ - время; U, V - продольные и поперечные составляющие скорости; k - кинетическая энергия турбулентности; ϵ - скорость диссипации; Pr_t - турбулентный аналог числа Прандтля; Pr_k - число Прандтля для кинетической энергии турбулентности; Pr_ϵ - число Прандтля для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности; μ_{Ef} - эффективная вязкость; μ_L - молекулярная вязкость; μ_T - турбулентная вязкость; C_1, C_2, C_μ - константы (приведены в табл.1); G - функция генерации турбулентности.

Для связи между коэффициентом турбулентной вязкости с кинетической энергией турбулентности и скоростью ее диссипации использовалась гипотеза Колмогорова-Прандтля.

Поскольку при проведении численных расчетов в качестве теплоносителя был взят воздух, то влиянием силы тяжести пренебрегли.

Непосредственное численное решение системы уравнений (2.1)-(2.9) прово-

Таблица 1

C_1	C_2	C_μ	Pr_ϵ	Pr_k
1,44	1,92	0.9	1,22	1,0

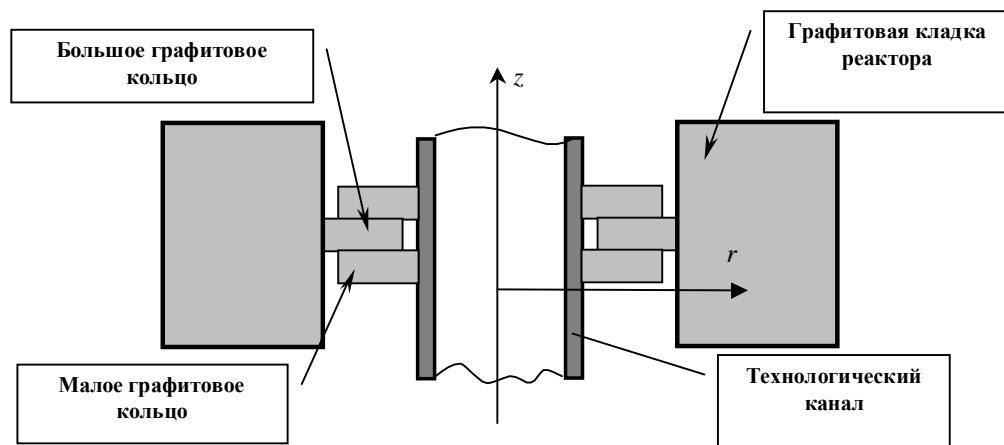


Рис. 2. Система координат расчетной области

дилось при помощи метода контрольного объема. Линеаризация конвективных слагаемых в уравнениях движения осуществлялась при помощи метода Ньютона. Для решения систем линейных уравнений использовалась неявная процедура (MSI), предложенная в работе [4]. Расчетная сетка в области течения теплоносителя формировалась со сгущением узлов в пристенной области. Система координат расчетной области приведена на рис.2.

Граничные условия для системы уравнений (2.1) – (2.6) задавались следующим образом

$$\begin{aligned} r=0 \quad \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad V=0 \\ r=r_{\text{CT}} \quad U=V=k=\varepsilon=0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

При постановке граничных условий для случаев непосредственного контакта ТК-графитовое кольцо, блок-графитовое кольцо необходимо учитывать неплотность прилегания этих элементов друг к другу. На рис.3 показана ситуация непосредственного контакта графит-графит с учетом воздушной прослойки.

Граничные условия для уравнения теплопроводности ставились следующим образом.

Для всех областей, где воздух непосредственно примыкает к графитовым кольцам или блоку, граничное условие имеет вид :

$$\lambda_{\text{в}} \frac{\partial t}{\partial z} = \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (2.11)$$

где $\lambda_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{гр}}$ – коэффициенты теплопроводности воздуха и графита.

Для областей прямого контакта кольцо-кольцо (рис.3) граничное условие ставится с учетом наличия воздушной прослойки за счет неплотного примыкания

$$q = \frac{t_{\text{CT1}} - t_{\text{CT3}}}{\frac{\delta_{\text{CT1}}}{\lambda_{\text{гр}}} + \frac{\delta_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}}} = \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial t}{\partial z}. \quad (2.12)$$

В этом соотношении t_{CT1} – температура в некоторой точке графитового

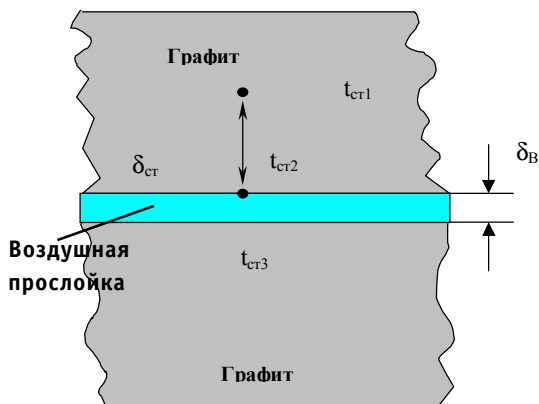


Рис. 3. К постановке граничного условия в месте контакта графит-графит; графит-технологический канал

кольца; δ_{CT1} – расстояние от точки с температурой t_{CT1} до места контакта с воздухом; δ_B – толщина воздушной прослойки; t_{CT3} – температура места контакта воздуха со вторым кольцом.

Для малых колец, примыкающих к технологическому каналу (рис.4), необходимо учитывать то обстоятельство, что кольцо соприкасается с ТК, во-первых, через воздушную прослойку, образующуюся за счет неплотного контакта между окисной пленкой и кольцом, а во-вторых, через окисную пленку сплава цирконий-ниобий. Граничное условие записывается следующим образом:

$$q = \frac{(t_{ГР} - t_{ТК})}{\frac{1}{\lambda_{ГР}} \ln \frac{r_3 + \delta_1}{r_3} + \frac{1}{\lambda_B} \ln \frac{r_3}{r_4} + \frac{1}{\lambda_{оп}} \ln \frac{r_4}{r_5}} = \lambda_{ТК} \frac{\partial t}{\partial r}. \quad (2.13)$$

Здесь $t_{ГР}$ – температура в некоторой точке графитового кольца; $r_3 + \delta_1$ – расстояние по радиусу до точки с температурой $t_{ГР}$; $\lambda_{оп}$ – коэффициент теплопроводности окисной пленки; $\lambda_{ТК}$ – коэффициент теплопроводности технологического канала; остальные обозначения как на рис.4. Для определения граничного условия на внутренней стенке канала необходимо учесть, что внутренняя стенка ТК омывается теплоносителем. При постановке граничного условия жидкость-стенка ТК использовалось условие равенства тепловых потоков, записанное при помощи законов Фурье и Ньютона-Рихмана. Средний коэффициент теплоотдачи определялся с помощью интеграла Лайона. Турбулентный аналог числа Прандтля в соответствии с рекомендациями работы [5] полагался равным 0.7 – для воздуха и 0.9 – для воды.

Граничное условие по всей высоте записывается следующим образом:

$$q = \frac{t_{CT} - t_{Ж}}{\alpha_T + \ln \frac{\delta_{оп}}{\lambda_{оп}}} = \lambda_{ТК} \frac{\partial t}{\partial r}. \quad (2.14)$$

Здесь α_T – коэффициент теплоотдачи теплоносителя.

Для больших колец, примыкающих к графитовому блоку (рис.5) граничное условие в месте контакта кольца с блоком ставится с учетом воздушной прослойки, образу-

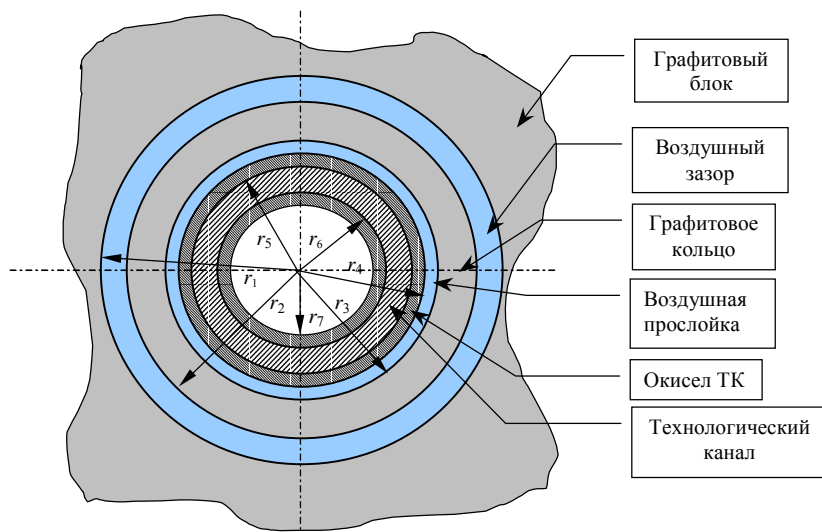


Рис. 4. Малое кольцо, примыкающее к технологическому каналу:

r_1 – радиус отверстия в графитовом блоке; r_2 – внешний радиус ТК; r_3 – внутренний радиус графитового кольца; r_4 – внешний радиус окисной пленки (расположенной снаружи ТК); r_5 – внешний радиус ТК; r_6 – внутренний радиус ТК; r_7 – внутренний радиус окисной пленки (расположенной внутри канала)

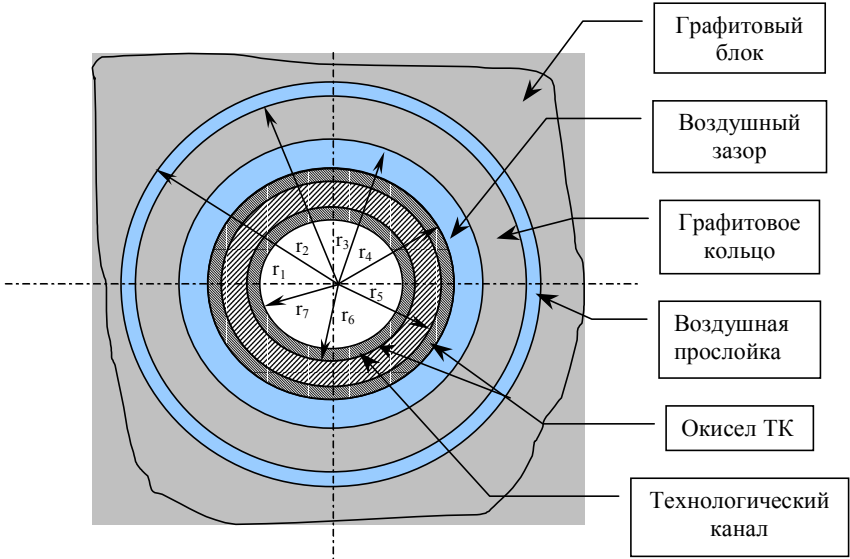


Рис. 5. Большое кольцо, примыкающее к графитовому блоку

щейся за счет неплотного примыкания одного к другому. Математическая форма записи граничного условия в этом случае аналогична соотношению (2.13). На рис.5 обозначения такие же, как и на рис.4.

Отметим, что при постановке граничных условий не учитывалось то обстоятельство, что графитовые кольца имеют разрез.

Численные расчеты проводились на сетке 150x150 узлов с затратами оперативной памяти ~ 65 Мбайт. Время счета одного типового варианта составляло в среднем 120-230 с., относительная точность расчета - 0,01%.

На рис.6 показано типичное распределение температуры в системе технологический канал – графитовый блок, полученное расчетным путем. При проведении расчета температура на входе в ТК полагалась равной 12°C, температура блока равнялась 65°C.

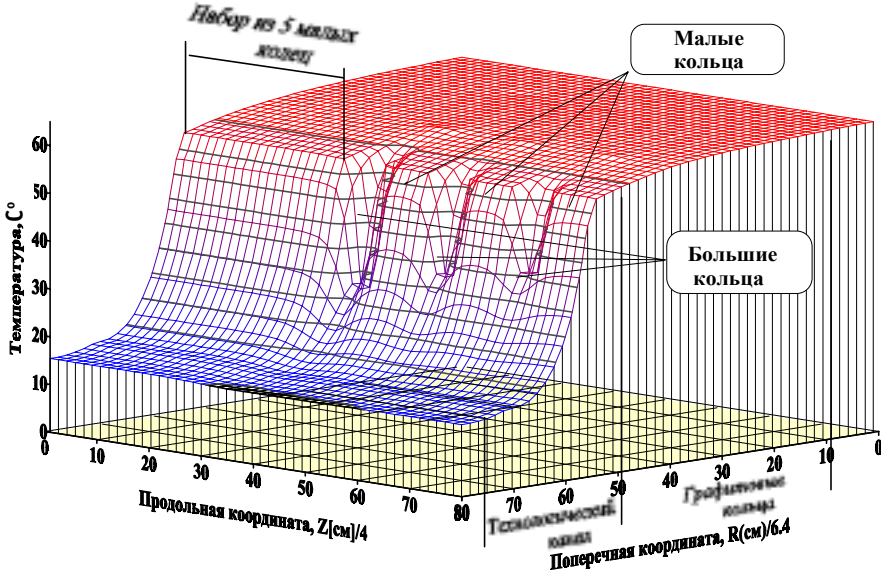


Рис. 6. Распределение температуры в системе ТК-графитовый блок

Подача теплоносителя - снизу вверх. Расчет проводился для 10 графитовых колец.

Из рисунка хорошо видно, что на прилегающих к ТК малых кольцах температура несколько выше, чем на больших. Интересно отметить, что в местах контакта графитовых колец с блоком поле температур остается равномерным. Проведенные расчеты подтверждают предположение о неравномерности распределения температуры по высоте технологического канала в условиях неравенства температур графитовой кладки и прокачиваемого теплоносителя.

Для экспериментальной проверки результатов, полученных расчетным путем, в лабораторных условиях была проведена серия модельных экспериментов, цель которых -

определить зависимость распределения температур на внутренней стенке циркониевой трубы (ТК) от расположения малых и больших графитовых колец и от несоосности ТК и графитового блока.

Экспериментальная установка (рис.8) представляет собой штатный графитовый блок со вставленным в него фрагментом технологического канала. Разогрев блока осуществляется при помощи электрического нагревателя мощностью 3.63 кВт, помещенного в керамические трубки, которые были закреплены на внешней поверхности блока, электропитание нагревателя - от автотрансформатора РНО-250-10. В нижней торцевой части фрагмента ТК было смонтировано устройство для подачи или отвода воды или воздуха.

Набор графитовых колец осуществлялся таким образом, чтобы смоделировать их



Рис. 7. Общий вид экспериментальной установки с термозондом №2

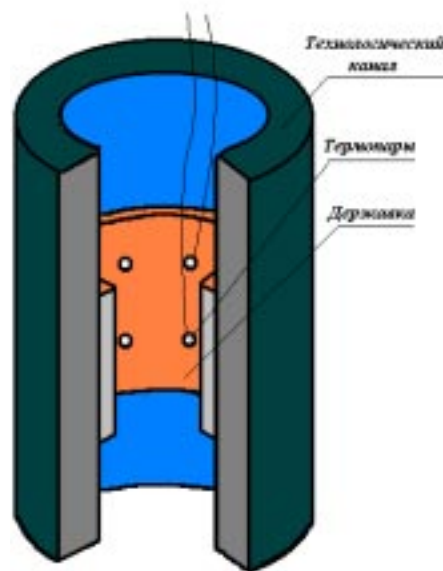


Рис. 8. Принципиальная схема термозонда №1 (разрез)



Рис. 9. Общий вид термозонда №2

предполагаемые дефекты на находящихся в эксплуатации реакторах РБМК. Подача охлаждающего ТК воздуха осуществлялась со скоростью $4\div 20$ м/с, что соответствует диапазону чисел Рейнольдса $1.7\cdot 10^4\div 4.2\cdot 10^4$.

Для непосредственного измерения температуры стенки ТК были изготовлены два термозонда. Первый представлял собой полый цилиндр, сделанный из пресшпана, на котором в два ряда с шагом в 90° располагалось восемь хромель-копелевых термопар (рис.8). Расстояние между верхним и нижним рядом составляло 2 см, что соответствует толщине графитового кольца.

Второй термозонд (рис.9) представлял собой систему вертикально расположенных стальных стержней, закрепленных на верхней и нижней фиксирующих шайбах, изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

На каждом из восьми стержней с помощью специального поджимного устройства закреплялся термометр сопротивления типа ТСП-50. Поджимное устройство позволяло регулировать силу прижима термометров к внутренней стенке ТК. Для перемещения термозонда по высоте канала использовалась стальная штанга длиной 2.5 м.

При проведении измерений первым термозондом обработка сигналов, поступающих с термопар, осуществлялась по двум независимым каналам. По первому каналу выполнялось непосредственное измерение величины термоЭДС цифровым ампервольтметром с компенсацией температуры холодного спая с помощью сосуда Дьюара.

Второй канал состоял из восьми нормирующих усилителей типа НУ-04, 32-канальной платы АЦП PCL-813 фирмы ADVANTECH, включенной в шину ISA персонального компьютера. Подключение нормирующих усилителей осуществлялось по двухпроводной схеме.

Обработка сигнала со второго термозонда также осуществлялась с помощью АЦП, но в этом случае использовались нормирующие усилители типа ПРИНТ-17, включенные по четырехпроводной схеме.

С целью проверки предположения о наличии градиента температур между областями примыкания к ТК больших и малых колец с помощью первого термозонда были проведены измерения температуры по высоте фрагмента технологического канала. Опыты проводились при температуре блока $\approx 95^\circ\text{C}$ и сравнительно невысоких скоростях прокачки воздуха. На рис.10 представлены некоторые результаты этих измерений. Из рисунка видно, что в областях, где расположены большие кольца, наблюдается явно выраженное снижение температуры внутренней стенки ТК, а в местах контакта малых колец - ее увеличение.

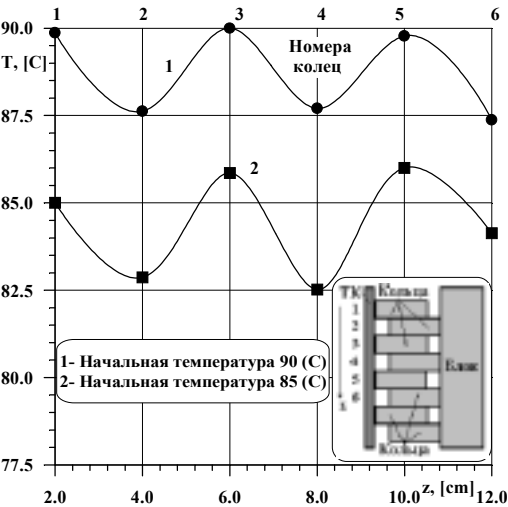


Рис. 10. Результаты измерения температуры по высоте ТК с нормальной укладкой колец

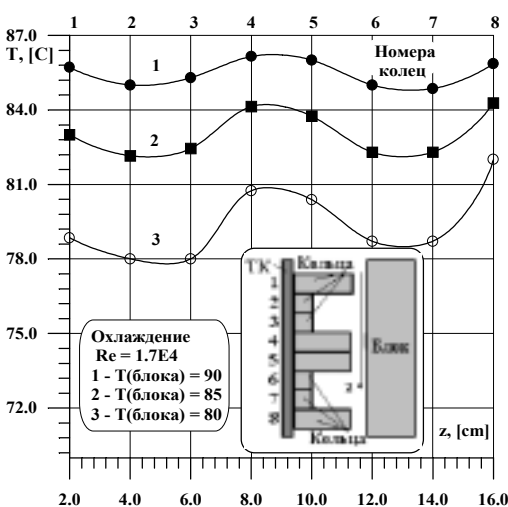


Рис. 11. Распределение температуры по высоте ТК с нарушением периодичности укладки

Таким образом, можно сделать вывод, что в случае, если графитовая кладка не имеет повреждений, то распределение температуры по высоте ТК должно иметь явно выраженную периодическую структуру и появление аperiodичности указывает на изменение величины газового зазора.

Опыты с нарушением периодичности укладки графитовых колец были выполнены с использованием первого термозонда. Укладка колец осуществлялась таким образом, чтобы смоделировать их частичное разрушение по окружности (в кольцах был выбран сегмент с углом раскрытия 157°). Результаты измерений для этого случая приведены на рис.11.

Хорошо видно, что области максимумов и минимумов в распределении температуры стали более протяженными, что также подтверждает предположение о зависимости температур на внутренней стенке ТК от расположения колец и величины газового зазора.

Измерения распределения температур по окружности ТК проводились в основном вторым термозондом и осуществлялись также с прокачкой воздуха. Графитовые кольца в центре блока укладывались с нарушением соосности между ТК и графитовым блоком. В точке 0° (рис.12) большие и малые кольца непосредственно соприкасались с графитовым блоком и внешней стенкой ТК. На рисунке показано характерное распределение температуры по окружности ТК в области большого кольца, расположенного на глубине 23 см от верхнего края блока при различных скоростях подачи охлаждающего воздуха. Температура блока в момент проведения эксперимента поддерживалась постоянной и равнялась 60°C . Из рисунка хорошо видно, что в месте наибольшего зазора наблюдается снижение температуры.

На рис.13 показаны распределения температур на внутренней стенке ТК для малого кольца с различными скоростями прокачки воздуха. Как и в предыдущем случае, в области максимального зазора имеется явно выраженный температурный минимум.

Сравнение графиков на рис.12 и 13 показывает, что в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса температура в области большого кольца выше, чем в области малого кольца. Последнее обстоятельство можно объяснить изменением механизма перетечек тепла по графитовым кольцам. В рассматриваемом нами случае наибольшее количество тепла передается через область большого кольца вследствие его непосредственного примыкания к каналу и значительного увеличения величины газового зазора в точке 180° в области малого кольца.

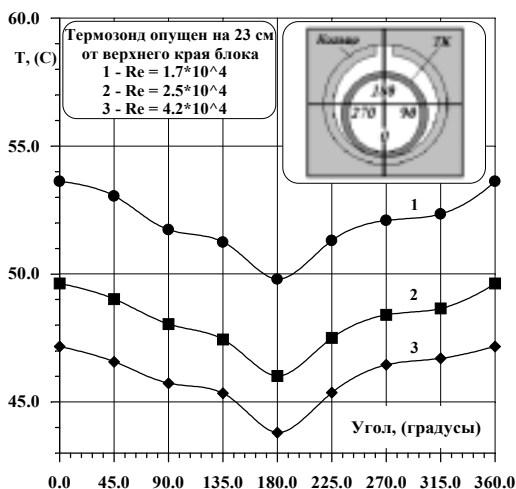


Рис. 12. Распределение температур в области большого кольца

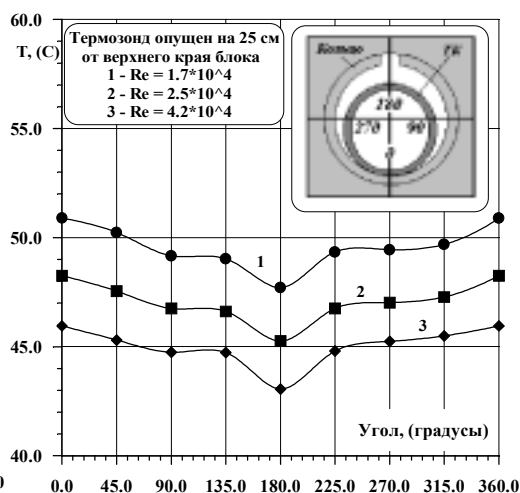


Рис. 13. Распределение температур в области малого кольца

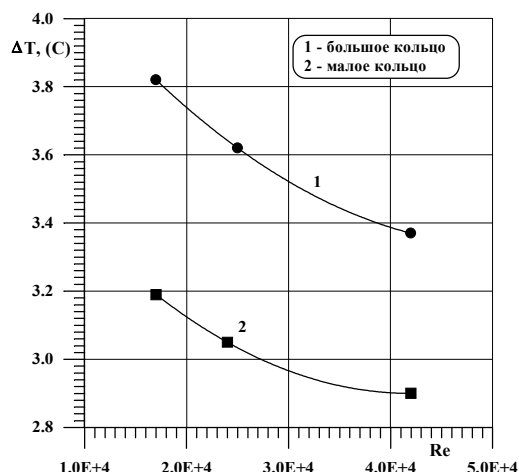


Рис. 14. Разность минимального и максимального значения температур для малого кольца

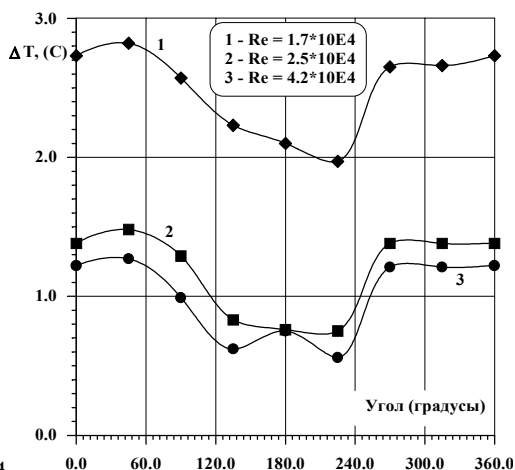


Рис. 15. Разность температур между большим и малым кольцами

Отметим, что разность температур между точками 0 и 180° с увеличением скорости прокачки воздуха начинает более слабо зависеть от числа Рейнольдса и асимптотически стремится к некоторому постоянному значению. Это особенно хорошо видно на примере малого кольца (рис. 14).

На рис.15 показана разность температур между большим и малым кольцами в зависимости от числа Рейнольдса. Хорошо видно, что при малых скоростях обтекания градиент температур увеличивается. Уменьшение градиента температур при больших значениях числа Рейнольдса можно объяснить тем, что коэффициент теплопроводности теплоносителя достаточно мал в рабочем диапазоне температур. Его величина для 30÷90°C и давлении 101.3 кПа составляет $\lambda = 26.8 \cdot 10^{-3} \div 31.3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) и теплоноситель за время прохождения рабочего участка стенда не обеспечивает необходимый для появления большого градиента температур унос тепла. Это указывает на то обстоятельство, что при проведении натурных экспериментов на АЭС с РБМК необходимо таким образом отрегулировать расход теплоносителя, чтобы обеспечить наибольшую разность температур между соседними кольцами.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов указывают на однозначное соответствие распределения температур на внутренней стенке ТК периоду расположения больших и малых колец и их взаимоположению относительно стенок ТК.

Однако для количественной оценки величины зазора на действующем реакторе необходимо уточнение существующих и постановка дополнительных граничных условий.

Ряд граничных условий, подлежащих уточнению, может быть получен с учетом геометрических параметров конкретного ТК и ячейки графитовой кладки. К таким параметрам, доступным для измерений, относятся:

- внутренний диаметр ТК;
- толщина стенки ТК;
- кривизна ТК;
- наличие разреза заданной геометрии на больших и малых кольцах;
- наличие фасок на стыках между графитовыми блоками.

Дополнительные граничные условия будут обусловлены неравномерностью распределения поля температур по радиусу и высоте активной зоны реактора.

Список литературы

1. Белянин Л.А., Лебедев Ю.В. и др. Безопасность АЭС с канальными реакторами. Реконструкция активной зоны. - М.: Энергоатомиздат, 1997.

2. *Chang K. C., Cebeci T.* Numerical aspects of turbulence models. – Intern. Symp. Comput. Fluids Dynamics, Tokyo, 1985. – Prep. Vol. 2. – P.538-549.
3. Турбулентность. Принципы и применения: /Под ред. У. Фроста и Т. Моулдена. – М.:Мир, 1980.
4. *Schneider G. E., Zedan M.* A Modified Strongly Implicit Procedure for the Numerical Solution of Field Problems. Numerical Heat transfer, 1981. – V.4. – P.1-19.
5. *Галин Н.М., Кириллов П.Л.* Тепло-массообмен (в ядерной энергетике). – М.: Энергоатомиздат, 1987.

Поступила в редакцию 14.05.99.

interaction with atmospheric precipitation are chosen. Quantitative estimations of a ratio of these factors in the real atmosphere are given.

УДК 541.64:541.183

Study of Influence of Alkaline Hydrolysis Products in Production of Track Membranes on the Basis of Polyethyleneterephthalate Films \T.E. Laricheva, A.A. Machula, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 10 titles.

The influence of ethyleneglycol (EG) and terephthalate ions (TPI), generated during an alkaline hydrolysis of polyethyleneterephthalate films, on the process of formation of track membranes is investigated. It is shown that TPI do not influence on the velocity of chemical etching polymer and of the latent tracks (LT). At the same time the kinetics of chemical etching polymer and of the LT essentially depends on the concentration of EG in etching solution. As a result accumulation of EG in the etching solution the selectivity of the process becomes worse along with the change of characteristics of track membranes.

УДК 539.172.8

Study of Phase Distribution of Initial and Final States of Multiparticle Systems in the Monte-Carlo Method of Classical Trajectories \A.E. Yanovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 14 illustrations. - References, 5 titles.

The results of calculation of phase distribution of reaction fragments simulated by three and four-particle models within the method of classical trajectories are represented in the paper.

УДК 621.039.525; 621.039.534.6

Universal Algorithm of the Monte-Carlo Method for Calculation of Blankets of Accelerator-Driven Systems \V.V. Korobeinikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 2 illustrations. - References, 5 titles.

The universal algorithm for physical calculation of subcritical systems with an external source of neutrons by the Monte-Carlo method is developed. This algorithm is effective in calculation of accelerator-driven systems within a wide range of subcriticality. Description, theoretical evidence, method of realization, and results of testing of the algorithm for the test subcritical systems with an external neutron source are given in the paper.

УДК 621.039

On the Method of Determination of Physical Characteristics of a Nuclear Reactor under Slow Reactivity Perturbation \N.A. Vinogorov, D.N. Jukovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 5 titles.

The method of determination of nuclear reactor characteristics under slow reactivity perturbation by means of measurement of the parameter providing the feedback is presented.

The application of the method is demonstrated by examples of estimation of the poisoning effect of xenon-135 and barometric reactivity coefficient for VVR.

УДК 621.039.553.34

Study of Dependence of Wall Temperature in the Technological Channel of the RBMK-Reactor on the Gas Clearance between the channels and Graphite Blocks \A.I. Trofimov, S.A. Vinogradov, I.A. Tchusov, V.I. Belozerov, M.A. Trofimov, I.A. Shvetsov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 11 pages, 1 table, 15 illustrations. - References, 5 titles.

Theoretical and experimental proof of the usage of data on the temperature field distribution over the inner surface of a technological channel (TC) for evaluating the size of the gas clearance in RBMK-reactors are considered in the paper. The calculations performed using k- ϵ turbulence model, showed that the size of the gas clearance considerably affects the temperature distribution over the length of the TC.

The experimental study carried out using probes of two types have shown that the violation of periodicity in staking of the cut spring rings results in distortion of the temperature field both over the length and radius of the TC. Thus a conclusion is reached that it is possible to extrapolate the size of the gas clearance on the base of the temperature field distribution.

УДК 539.1.04:669.017.3

Cluster Structures in FCC-materials at High Levels of Radiation Damage \ V.S. Khmelevskaya, N.V. Kulikova, A.V. Nakin, V.G. Malynkin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 2 tables, 5 illustrations. - References, 8 titles.

It is shown, that in various metal materials (alloys on the basis Fe-Ni-Cr, Ni-Cr, Cu-Ni, Fe-Cr, V-Ti-Cr, and also pure Zr and Ti) as a results of interaction with ion radiation special non-equilibrium states arise. The model of local reorganization of a crystal lattice in the vicinity of vacancy is suggested atomic groups and small clusters of icosahedral symmetry are formed. The computer experiment shows that a bimodal distribution of lengths of edges of a polyhedron appears at such transformation and it should lead to splitting of X-ray diffraction peaks.

УДК 539.163.517.91

Information Reference System «Transmutation of Nuclides in Nuclear Reactors» \ V.I. Plyaskin, R.A. Kosilov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages. - References, 5 titles.

Description of the information reference system is given permits to perform calculations of nuclides transmutation in nuclear reactors. The offered algorithms of calculation of the basic parameters of the transmutation are based on the directional graph of the transmutations of nuclides, have allowed to increase the rate of calculations. The calculations are carried out using newest databases for nuclear-physical constants which raise the reliability of results.

УДК 539.17.212

Calculation of Angular Distribution of Direct Pick-up Reaction with Transfer of Three Nucleons \ V.S. Masterov, N.P. Savelyev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 5 illustrations. - References, 17 titles.

The computational model for the three-nucleon transfer reaction (p, α) is developed. The approach to calculation of the dynamic amplitude of the differential cross-section is offered. The results of calculations of the cross-sections for nuclei ^{39}K , ^{42}Ca , ^{58}Ni within the energy range from 20 up to 72 MeV are given.