

- 2008.
2. Nakicenovic N., Gruber A., Donald A. Global Energy Perspectives. International Institute for Applied Systems Analysis and World Energy Council. Cambridge University Press, 1998.
 3. Тарханов А.В., Шаталов В.В. Планы развития уранодобывающей промышленности в России. — В сб.: Развитие ядерной энергетики России и Украины — фактор устойчивости межгосударственного сотрудничества. М.: Наука, 2009, с. 69—77.
 4. Тарханов А.В., Шаталов В.В. Новые тенденции развития мировой и российской минерально-сырьевой базы

урана. — В сб.: Минеральное сырье. Сер. геолого-экономическая, 2008, № 26.

5. Живов В.Л. Уранодобывающая отрасль России: состояние и перспективы развития. — Горный журнал, 2008, № 3, с. 6—11.
6. Бойцов А.В., Путивцева Н.В., Басов В.С. Добыча урана в 2007: факты и ожидания. — Вестник Атомпрома, 2008, № 3, с. 24—32.

Поступила в Редакцию 17.09.09

УДК 541.183.621.039.542

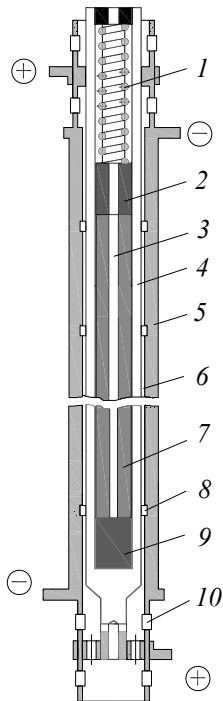
МАССОПЕРЕНОС ДИОКСИДА УРАНА В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ ТОПЛИВНОГО СЕРДЕЧНИКА ТВЭЛА ОДНОЭЛЕМЕНТНОГО ЭГК

Гонтарь А.С., Сотников В.Н. (НИИ НПО «Луч», г. Подольск, Московская обл.)

Радиальный массоперенос диоксида урана в зазоре между сердечником и оболочкой вентилируемого ТВЭЛА одноэлементного ЭГК приводит к ликвидации этого зазора или приближает реальный контакт к идеальному термическому контакту (рис. 1) [1]. Ранее проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали, что радиальный массоперенос во всем диапазоне

реализуемой рабочей температуры оболочки и тепловой мощности ТВЭЛА осуществляется в свободномолекулярном режиме и завершается за малое время (десятки-сотни часов) по сравнению с ресурсом [2]. Таким образом, независимо от исходной конструкции ТВЭЛА возникает непосредственное нагружение оболочки распухающим сердечником.

Продольный массоперенос в центральном канале сердечника изменяет конфигурацию расположения топлива с возможностью блокировки канала конденсатом диоксида урана. Возникающие местные сужения исходного канала вызывают ответное повышение скорости деформации оболочки, а образование замкнутой вакуумно-плотной полости приводит к неприемлемому нагружению оболочки вышедшими из топлива газообразными продуктами деления. Продольный массоперенос вследствие малых осевых градиентов температуры является медленно протекающим процессом, по длительности сравним с ресурсом, поэтому требует детальных исследований с учетом следующих сопутствующих факторов: циклическое участие в массопереносе кислорода при сверхстехиометрическом составе диоксида урана, изменение кислородного коэффициента диоксида урана вследствие ухода кислорода в газовой фазе из системы и поступления дополнительного кислорода из диоксида при выгорании урана, локальные утечки тепла из сердечника через систему



Р и с. 1. Конструктивная схема одноэлементного ЭГК: 1 — фиксирующий узел; 2 — верхний торцевой отражатель; 3 — центральный канал; 4 — оболочка (эмиттер); 5 — коллектор; 6 — межэлектродный зазор; 7 — топливный сердечник; 8 — дистанционатор; 9 — нижний торцевой отражатель; 10 — сильфонно-гермоводный узел

дистанционаторов, а также изменение температуры топлива в процессе радиального массопереноса.

Поскольку в одноэлементном ЭГК используется упрочненная эмиттерная оболочка, эффективно перераспределяющая объемное изменение при распухании диоксида урана в направлении центрального канала сердечника, а характерная для такого ЭГК рабочая температура топлива приводит к выходу радиационных пор в том же направлении, канал в сердечнике остается почти неизменным из-за взаимно компенсирующего влияния этих процессов [3]. По этой причине вопросы распухания диоксида урана, ползучести сердечника и кинетики выхода радиационных пор остаются вне рамок данной статьи.

В настоящей статье излагается разработанный метод расчета продольного массопереноса в центральном канале сердечника с учетом совместного влияния указанных определяющих факторов и представлены результаты расчетных исследований при рабочих параметрах одноэлементного ЭГК.

Уравнения, описывающие перенос урансодержащих компонентов. Параметрические расчеты показывают, что при диаметре центрального канала 5—8 мм и температуре топлива ниже 2200 К, соответствующей максимально допустимой тепловой мощности одноэлементного ЭГК, в канале имеет место свободномолекулярный режим течения паров диоксида урана.

При записи уравнений массопереноса для указанного режима считалось, что испарение молекул со стенки имеет равновесный характер, соответствующий значениям кислородного коэффициента и температуры в рассматриваемой точке на поверхности канала. Коэффициенты испарения и конденсации приняты равными единице. Рассматривался канал, начинающийся при $z = 0$ и заканчивающийся при $z = L$. При этом считалось, что на концах канала давление компонента газовой фазы равно p_0 и p_L соответственно. Поток массы этого компонента может быть выражен с использованием углового коэффициента $F_{z\xi}$, представляющего собой вероятность того, что частица, прошедшая через сечение канала в точке z , пройдет затем через сечение канала в точке ξ , не испытав на пути столкновений со стенками канала [4].

Выражение для потока массы $Q(z)$ через сечение канала в координате z в момент времени t имеет вид [5]

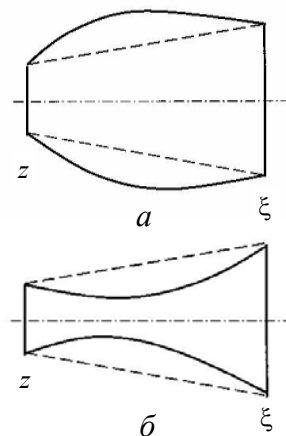
$$Q(z, t) = \sqrt{\frac{\pi m}{2k}} r^2(z, t) \left[\left(\frac{p_0}{\sqrt{T_0}} - \frac{p_n(0, t)}{\sqrt{T(0, t)}} \right) F_{z0} - \left(\frac{p_L}{\sqrt{T_L}} - \frac{p_n(L, t)}{\sqrt{T(L, t)}} \right) F_{zL} - \int_0^L \frac{d}{d\xi} \left(\frac{p_n(\xi, t)}{\sqrt{T(\xi, t)}} \right) F_{z\xi} d\xi \right], \quad (1)$$

где m — масса молекулы топлива; k — постоянная Больцмана; $r(z, t)$ — радиус канала; $p_n(z, t)$ — давление насыщенных паров топлива; $T(z, t)$ — абсолютная температура поверхности канала.

Для канала с расширенным локальным сечением (рис. 2, а) выражение для углового коэффициента $F_{z\xi}$ имеет вид [4]

$$F_{z\xi} = \frac{(\xi - z)^2 + r_\xi^2 + r_z^2 - \left[\left[(\xi - z)^2 + r_\xi^2 + r_z^2 \right]^2 - 4r_\xi^2 r_z^2 \right]^{1/2}}{2r_z^2}. \quad (2)$$

Выражение для потока массы (1) справедливо и для канала, имеющего локальные сужения сечения, однако угловой коэффициент $F_{z\xi}$ уже не описывается выражением (2), так как в этом случае стенки затеняют сечение ξ относительно сечения z (см. рис. 2, б). Эффект затенения учитывается путем умножения углового коэффициента (2) на минимальное по длине участка канала отношение площадей сечений реального канала и конуса, образованного сечениями в точках z и ξ . Приемлемость такого под-



Р и с. 2. Форма центрального канала в топливном сердечнике: а, б — канал с выпуклыми и вогнутыми стенками соответственно

хода связана с тем, что в обоих случаях для оценки углового коэффициента $F_{z\xi}$ используется геометрическая вероятность.

Зная распределение потока паров топлива по длине канала, легко найти потоки на стенку (или со стенки) канала путем дифференцирования $Q(z)$ по координате z . Затем по найденным значениям радиальных потоков определяется изменение радиуса канала в каждом сечении за временной шаг, которое используется, в частности, для вычисления углового коэффициента $F_{z\xi}$.

Давление паров в газовой фазе над UO_{2+x} .

Известно, что газовая фаза над UO_{2+x} содержит несколько компонентов, основными из которых являются UO_2 , UO_3 , UO и O_2 . Их относительное содержание зависит от состава топлива и температуры. Для расчета давления насыщенных паров указанных компонентов использовали термохимическую модель оксидов актиноидов [6].

Относительная концентрация шести- $[\text{U}^{6+}]$, двух- $[\text{U}^{2+}]$ и четырехвалентных ионов урана $[\text{U}^{4+}]$ рассчитана по следующим выражениям, полученным на основе [6]:

$$[\text{U}^{6+}] = \left[x - 4(1+x) K_{24}/K_{46} + \sqrt{x^2 - 8x(1+x)K_{24}/K_{46} + 16(1+x)^2 K_{24}^2/K_{46}^2 + 4(1+x)^2 K_{24}/K_{46} (1 - 4K_{24}/K_{46})} \right] / \left[2(1 - 4K_{24}/K_{46}) \right];$$

$$[\text{U}^{2+}] = [\text{U}^{6+}] - x; \quad [\text{U}^{4+}] = 1 + x - 2[\text{U}^{6+}],$$

где K_{24} , K_{46} — константы равновесия, определяющие относительное содержание ионов [6].

После расчета относительной концентрации вычисляется искомое давление насыщенных паров компонентов паровой фазы p_i по формулам

$$\begin{aligned} p_{\text{UO}} &= 2 K_{\text{UO}} [\text{U}^{2+}]; \\ p_{\text{UO}_2} &= 4 K_{\text{UO}_2} [\text{U}^{4+}]; \\ p_{\text{UO}_3} &= 8 K_{\text{UO}_3} [\text{U}^{6+}]; \\ p_{\text{O}_2} &= \left\{ K_{46} (2+x) \frac{[\text{U}^{6+}]}{[\text{U}^{4+}]} \right\}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где константы равновесия K_i ($i = \text{UO}$, UO_2 или UO_3) находят согласно [6] по соотношению $\ln K_i = A - (B/T)$. Коэффициенты A и B представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения A и B для вычисления констант равновесия

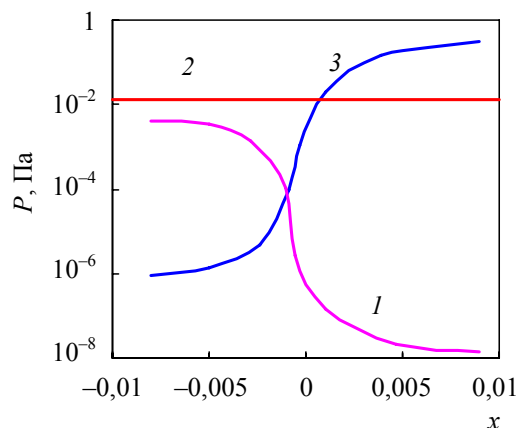
Константа	A	$B \cdot 10^3$
K_{UO}	11,9	49,5
K_{UO_2}	19,9	74
K_{UO_3}	11,9	44
K_{24}	13,6	78,3
K_{46}	5	16,4

Согласно давлению паров урансодержащих компонентов в газовой фазе над UO_{2+x} в досте-хиометрической области при $-0,005 \leq x \leq 0$ основным компонентом газовой фазы является UO_2 , давление паров которого не зависит от состава топлива (рис. 3). Для топлива сверхсте-хиометрического состава при $x > 0,001$ основным компонентом газовой фазы становится UO_3 , давление которого растет с увеличением отклонения от стехиометрического состава.

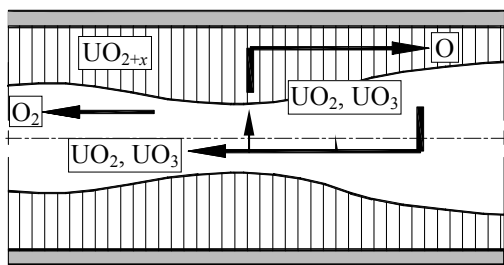
Перераспределение компонентов топли-ва. В составе разработанного одноэлементного

ЭГК использовали диоксид урана с кислородным коэффициентом $2_{+0,005}$ для обеспечения совместимости диоксида с молибденовой оболочкой и минимизации массопереноса в

межэлектродном зазоре ЭГК. В этом случае пе-ренос топлива в газовой фазе в виде молекул UO_3 сопровождается уменьшением содержания кислорода в зоне испарения и увеличением в зоне конденсации. В силу малого содержания



Р и с. 3. Зависимость давления насыщенных паров урансодержащих компонентов UO (1), UO_2 (2), UO_3 (3) от параметра $x = \text{O/U} - 2$ при 2000 К



Р и с. 4. Схема перераспределения кислорода в твэле при сверхстехиометрическом составе диоксида урана

избыточного кислорода лишь незначительное количество топлива может быть перенесено в зону испарения.

Однако экспериментальные данные показывают, что в неизотермических условиях свободный кислород в виде межузельных ионов перераспределяется в объеме диоксида урана. При этом состав диоксида урана в менее нагретой зоне смещается к стехиометрическому, а коэффициент диффузии кислорода достигает более 10^{-4} см²/с при 1500—2100 К [7]. Таким образом, в твэле кислород, перенесенный в зону конденсации, возвращается в зону испарения и поэтому может многократно участвовать в переносе топлива в виде UO₃ из зоны испарения (рис. 4). Процесс обратного переноса кислорода является достаточно быстрым, что позволяет использовать в расчетах стационарное распределение избыточного кислорода, соответствующее распределению температуры в рассматриваемый момент времени.

В этом случае

$$x(z, r) = C \exp[-Q^*/RT(z, r)]. \quad (4)$$

В расчетах теплота переноса Q^* принималась равной 142 кДж/моль [8]. Постоянная C определялась из условия нормировки распределения (4) на полное содержание кислорода в сердечнике твэла:

$$C = \frac{x_{\text{ср}} \int_0^L dz \int_{r_k(z)}^{R_c} 2\pi r dr}{\int_0^L dz \int_{r_k(z)}^{R_c} \exp[-Q^*/RT(z, r)] 2\pi r dr},$$

где L , R_c — длина и наружный радиус топливного сердечника соответственно; $r_k(z)$ — радиус центрального канала в сечении z .

Кислородный коэффициент диоксида урана при эксплуатации ЭГК изменяется за счет следующих факторов: освобождение атомов кисло-

рода при делении урана, окисление продуктов деления, вынос оксидов урана и свободного кислорода за пределы твэла (см. рис. 4). Количество освобожденных атомов кислорода легко вычисляется по тепловой мощности твэла. Поглощение кислорода определяется спектром продуктов деления, их выходом и состоянием в топливе, которые в соответствии с [6] представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Выход и состояние основных продуктов деления ²³⁵U

Группа	Выход	Состояние
Zr + Nb	0,298	ZrO ₂ , NbO ₂
Y + редкоземельные элементы	0,534	Оксиды вида Y ₂ O ₃
Ba + Sr	0,149	BaO, SrO
Mo	0,240	Металл + MoO ₂
Ru + Tc + Rh + Pd	0,263	Металлы
Cs + Rb	0,226	Пары металлов
I + Te	0,012	Пары
Xe + Kr	0,251	Инертные газы

В области рабочей температуры твэла (выше 1400 К) все элементы, расположенные ниже молибдена, не окисляются. Некоторую неопределенность в характер изменения O/U вносит доля окисленного молибдена. Если эту долю обозначить f_{Mo} , то текущую скорость изменения количества атомов кислорода $\dot{N}_0(t)$ в матрице топлива за счет деления и взаимодействия с продуктами деления в момент времени t можно выразить в виде

$$\dot{N}_0(t) = 2\pi \int_0^L \int_{r_k(z)}^{R_c} \rho \dot{F}(z, \rho) \times \\ \times [0,454 - 0,48 f_{\text{Mo}}(z, \rho, t)] d\rho dz,$$

где $\dot{F}(z, \rho)$ — число делений в единичном объеме топлива в точке с координатами z и ρ в единицу времени.

Коэффициенты 0,454 и 0,48 определены для выхода продуктов деления, представленных в табл. 2.

С использованием выражения для свободной энергии образования оксида MoO₂ и уравнения баланса кислорода [6] показано, что при температуре эмиттера ЭГК ~1800 К и исходном $x_0 \geq 0,003$ значение f_{Mo} близко к единице.

Унос кислорода за пределы твэла в виде UO_2 и UO_3 рассчитывается по формуле (1). При расчете уноса предполагали, что свободный кислород не взаимодействует со стенками, а поток ограничивается максимальным газодинамическим сопротивлением центрального канала в торцевом отражателе твэла (см. рис. 1). Для этого случая выражение для потока свободного кислорода $Q_{\text{O}_2}(t)$ за пределы твэла в момент времени t следует из известных формул для проводимости длинных труб и каналов при молекулярном режиме течения [9] и имеет вид

$$Q_{\text{O}_2}(t) = \frac{8}{3} r_1^3 \sqrt{\frac{\pi m_{\text{O}_2}}{2kT_1}} \frac{P_{\text{O}_2}}{l_1},$$

где r_1 , l_1 , T_1 — соответственно радиус, длина и температура поверхности центрального канала в верхнем торцевом отражателе (см. рис. 1), который является основным газодинамическим сопротивлением на пути потока молекул, выходящих за пределы твэла; m_{O_2} — масса молекулы кислорода; P_{O_2} — давление кислорода на входе в отражатель, рассчитываемое по формуле (3).

Среднее отклонение состава топлива от стехиометрического в момент времени t по рассчитанным значениям $Q_{\text{UO}_2}(0, t)$, $Q_{\text{UO}_3}(0, t)$ и $Q_{\text{O}_2}(0, t)$ определяется по формуле

$$x_{\text{cp}}(t) = \left[(2 + x_0) N_{\text{U}}^0 - 2/m_{\text{UO}_2} \int_0^t Q_{\text{UO}_2}(0, \tau) d\tau - 3/m_{\text{UO}_3} \times \right. \\ \left. \times \int_0^t Q_{\text{UO}_3}(0, \tau) d\tau - 2/m_{\text{O}_2} \int_0^t Q_{\text{O}_2}(0, \tau) d\tau \right] / \left[[1 - \beta(t)] N_{\text{U}}^0 - \right. \\ \left. - 1/m_{\text{UO}_2} \int_0^t Q_{\text{UO}_2}(0, \tau) d\tau - 1/m_{\text{UO}_3} \int_0^t Q_{\text{UO}_3}(0, \tau) d\tau \right] - 2, \quad (5)$$

где N_{U}^0 — исходное количество атомов урана в топливном сердечнике; m_i — масса молекулы i -го компонента; $\beta(t)$ — выгорание топлива в момент времени t .

Формула (5) получена на основе простого рассуждения. Числитель правой части характеризует общее количество атомов кислорода в момент времени t . Оно равно разности исходного количества атомов (уменьшаемое) и количества атомов, унесенных в составе UO_2 , UO_3 и O_2 (соответственно первое, второе и третье вы-

читаемые). Для диоксида урана сверхстехиометрического состава уносом кислорода в виде UO можно пренебречь. Знаменатель представляет собой аналогичное выражение для атомов урана.

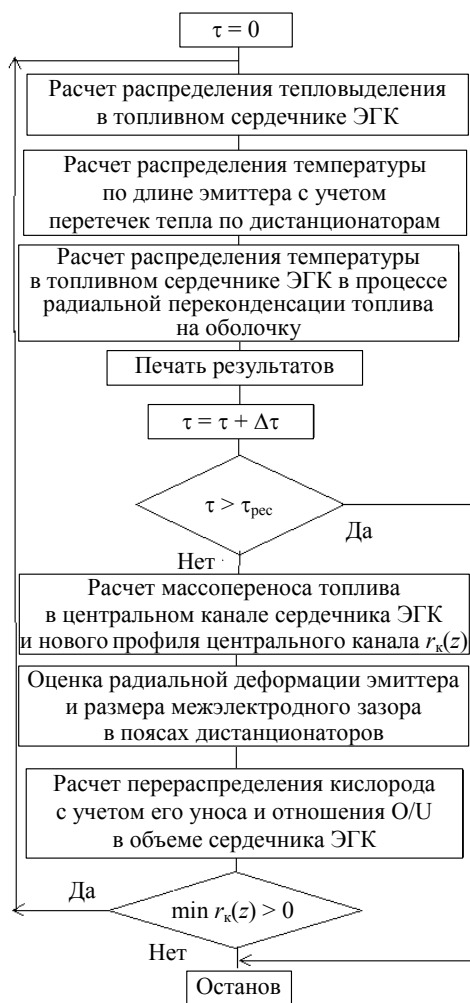
Влияние дистанционаторов на температурные поля и массоперенос. Распределение температуры в топливном сердечнике в разработанной модели рассчитывается с учетом изменения профиля центрального канала на основе решения одномерной ввиду значительной длины сердечника в одноэлементном ЭГК задачи теплопроводности. Распределение температуры по длине эмиттерной оболочки твэла, полученное путем теплоэнергетического расчета, используется в качестве граничного условия. При этом отвод тепла от твэла по дистанционаторам может привести к появлению локального минимума в распределении температуры по длине оболочки, следовательно, и по длине центрального канала. В результате этого в центральном канале в области расположения дистанционаторов появляется локальная зона интенсивной конденсации. Для нахождения площади контактирования известными методами решалась термомеханическая задача о взаимодействии фиксаторов с эмиттером и коллектором. В результате получена зависимость площади контактирования от деформации эмиттера, геометрических размеров фиксаторов и свойств материалов.

При решении тепловой задачи рассматривалось сплошное кольцо из материала дистанционаторов, высота которого определялась из условия равенства площади контакта у кольца и всех дистанционаторов.

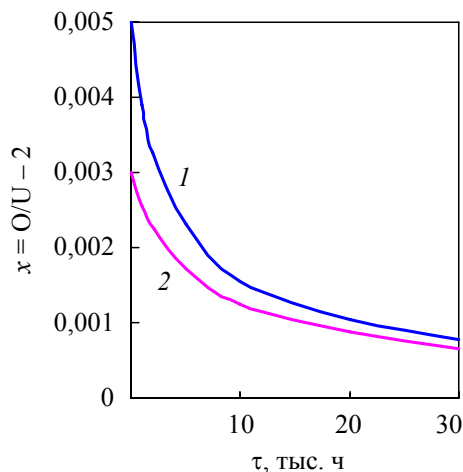
В расчетах задаваемая скорость деформации, постоянная для каждого пояса дистанционатора, соответствует деформации эмиттеров в экспериментальных активных зонах термоэмиссионного реактора-преобразователя.

Результаты расчета. На основе изложенной методики разработана компьютерная программа ROMEO для расчета массопереноса диоксида урана в сердечнике (рис. 5). В дальнейшем программа была протестирована по результатам послереакторных исследований одноэлементных ЭГК, прошедших ресурсные испытания $(5-12) \cdot 10^3$ ч в составе наземных прототипов ЯЭУ.

На рис. 6 показано, как изменяется во времени среднее по топливному сердечнику отклонение от стехиометрии при исходных значениях 0,005 и 0,003. Видно, что с течением времени



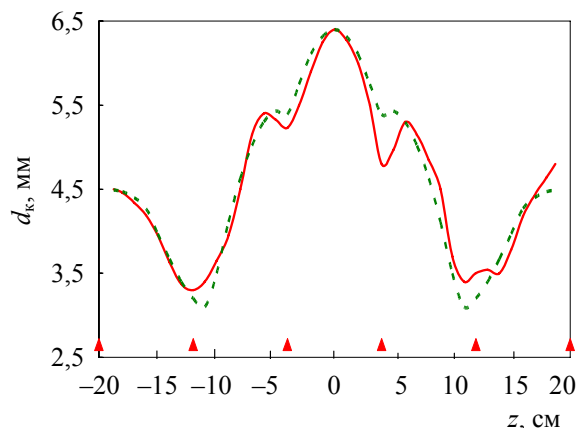
Р и с. 5. Блок-схема программы ROMEО



Р и с. 6. Изменение во времени среднего отклонения состава топлива от стехиометрического при исходном 0,005 (1), 0,003 (2)

состав топлива приближается к стехиометрическому. Это связано в основном с уносом кислорода за пределы топливного сердечника при эксплуатации одноэлементного ЭГК.

Рис. 7 демонстрирует близкое совпадение измеренного и априорно рассчитанного профи-

Р и с. 7. Профиль центрального канала сердечника ЭГК, испытанного в составе прототипа ЯЭУ ($O/U = 2,003$, $\tau \approx 12$ тыс. ч): — — эксперимент; - - - — расчет; ▲ — расположение пояса дистанционатора (z — координата по длине ЭГК от центра активной зоны; d_k — диаметр центрального канала)

лей центрального канала в сердечнике после длительных испытаний. В качестве исходных данных в расчетах приняты диаметр центрального канала 4,5 мм, тепловая мощность твэла 3 кВт, соответствующая ей температура оболочки 1820 К. Видно, что канал остается незаблокированным конденсатом и поэтому может использоваться в качестве простейшего газоотводного устройства, обеспечивающего удаление газообразных продуктов деления из внутренней полости твэла. Одновременно он выполняет функцию демпфера, который служит для перераспределения объемных изменений диоксида урана оболочкой, обладающей высоким сопротивлением ползучести [2]. Кроме того, видно, что профиль канала изменяется на участках локального охлаждения оболочки в местах расположения дистанционаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонтарь А.С., Еремин С.А., Лапочкин Н.В. и др. Усовершенствованный одноэлементный электрогенерирующий канал для термоэмиссионных ЯЭУ повышенной мощности. — В сб.: Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе-2005». Москва—Подольск, 2005, т. 2, с. 267—270.
2. Гонтарь А.С., Николаев Ю.В., Нелидов М.В. и др. Проблемы разработки термоэмиссионных твэлов. Тезисы докл. отраслевой юбилейной конф. «Ядерная энергетика в космосе». Обнинск, 1990, с. 193—195.
3. Гонтарь А.С., Нелидов М.В. Моделирование высокотемпературного распухания диоксида урана и деформационного поведения твэла. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 3, с. 172—179.

4. Gontar A.S., Kuchеров R.Ya., Nelidov M.V. et al. Some questions of uranium dioxide mass transfer influence on high-temperature fuel element behaviour. — In: Proc. of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. New York, 1989, v. 6, p. 2803—2808.
5. Шулепов Л.Н. Массоперенос в коническом канале при наличии процессов испарения и конденсации на стенках канала. — Инж.-физ. журн., 1978, т. 35, № 2, с. 284—286.
6. Olander D. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements. US Department of Energy, 1976. 610 p.
7. Breitung W. Oxygen self and chemical diffusion coefficients in UO_{2+x} . — J. Nucl. Mater., 1978, v. 74, № 1, p. 10—18.
8. Norris D. Solid state transport as a mechanism of oxygen thermomigration in $(U, Pu)O_{2+x}$. — Ibid., 1979, v. 79, p. 118—127.
9. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964.

Поступила в Редакцию 30.06.09

УДК 621.039.536

СВЯЗЬ МИКРО- И МАКРОДЕФОРМАЦИЙ И КОНСТАНТ УПРУГОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫМ ЭФФЕКТАМ В РЕАКТОРНОМ ГРАФИТЕ

Панюков С.В. (Физический ин-т им. П.Н. Лебедева, г. Москва),

Субботин А.В. (ЗАО НПК «Атомтехнопром», г. Москва)

Уникальные свойства графита определяются его морфологией, характеризуемой двумя основными компонентами — наполнителем и связующим, а также наличием ансамбля микротрещин и технологических пор [1—4]. Связующее имеет мелкокристаллическую однородную структуру, наполнитель — иерархическую структуру, образуемую микрокристаллитами графита, совершенство кристаллической структуры которых, в свою очередь, может нарушаться в зависимости от температуры отжига наличием определенной доли турбостратной структуры. Микрокристаллиты образуют различного рода образования — кристаллиты с разной степенью выраженности текстуры [3] и анизотропией свойств [5].

При описании радиационно-индуцированных эффектов графит рассматривается как поликристалл, состоящий из определенным образом упорядоченных кристаллитов. Кристаллит естественным образом определяется как максимальное образование из микрокристаллитов. Деформацию и изменение формы кристаллита можно считать аффинными. Дальний текстурный порядок в графите либо значительно ослаблен, либо отсутствует в зависимости от степени разупорядоченности в ориентации кристаллитов. Различие в ориентации соседних кристаллитов при наличии анизотропии их свойств ведет к появлению микротрещин на границах кристаллитов, которые вносят определяющий вклад в

упругость структурно-разупорядоченных твердых тел.

Причиной формирования микротрещин при изготовлении искусственного графита на стадии его охлаждения является значительная анизотропия коэффициентов термического расширения микрокристаллитов графита, формирующих кристаллит. Дальнейшая эволюция системы микротрещин на стадии облучения графита инициируется изменением формы кристаллитов вследствие радиационно-индуцированного развития в них микроструктуры. Такая микроструктура формируется, в основном, базисными дислокационными петлями, ориентация которых определяется ориентацией базисных плоскостей кристаллической решетки микрокристаллита графита. Таким образом, радиационно-индуцированное изменение формы кристаллитов является движущей силой возникновения радиационных эффектов на макроуровне [6, 7]. Целью настоящей работы является установление связи между микро- и макродеформациями с учетом различия констант упругости и морфологии составляющих реакторного графита.

Макродеформация графита описывается теорией, которая принимает во внимание как существование внутренних напряжений в графите, так и нелинейную микродеформацию кристаллита [6]. В настоящей статье предлагается общий подход, позволяющий понять и описать вклад каждой составляющей морфологии графита — наполнителя, связующего и ансамбля мик-