

Влияние распределения температуры на распухание сердечников из UO_2 , $UO_2 - PuO_2$

КУЗЬМИН В. И., ЛЕБЕДЕВ И. Г.

УДК 621.039.542.342

Одним из процессов, влияющих на работоспособность твэлов, в том числе и с окисным горючим из UO_2 , $UO_2 - PuO_2$, является радиационное распухание горючего. Экспериментальные данные [1, 2] о влиянии отдельных параметров на объемные изменения окисного горючего из UO_2 , $UO_2 - PuO_2$ при облучении часто не согласуются между собой не только количественно, но в некоторых случаях и качественно. Расчеты объемных изменений окисного горючего, особенно вызванных газообразными продуктами деления, в настоящее время невозможно выполнить достаточно точно.

Вклад твердых продуктов деления в распухание был определен ранее [3, 4]. В настоящей работе определялось влияние распределения температуры в облученном горючем из UO_2 и $UO_2 - PuO_2$ на величину общей пористости и рассматривался метод расчета объемных изменений цилиндрических сердечников из окисного горючего.

Методика исследования

Исследование проводили на образцах UO_2 и смешанного горючего $UO_2 - PuO_2$, содержащего 15 и 20% PuO_2 . Спеченные брикеты

Характеристика образцов и условия облучения

Таблица 1

Состав образцов	Пористость до облучения, %	Температура горючего, °C		Среднее по сечению выгорание, %	Линейная мощность, вт/см
		на поверхности	в центре		
UO_2	5	700	1700	0,4	350
UO_2	5	1230	1600	1,0	275
UO_2	5	1400	2200	1,3	345
UO_2	6	920	1550	2,7	250
UO_2	7	1230	2350	2,9	440
UO_2	6	1120	1800	3,0	305
UO_2	8	800	1450	4,2	255
UO_2	6	1050	2250	4,8	510
UO_2	2,5	890	1460	5,3	320
UO_2	9	780	1860	5,6	300
UO_2	8	1000	2050	6,6	415
UO_2	9	1100	2500	8,1	500
UO_2	8	1100	2000	12,8	310
(0,2 Pu—0,8 U) O_2	2	1100	1800	14,6	245
(0,15 Pu—0,85 U) O_2	3	1150	1750	17,1	310

загружали в оболочку из стали ОХ16Н15МЗБ, и оболочку герметизировали сваркой.

Образцы облучали в реакторе СМ-2 до различного выгорания: от 0,4 до 17% тяжелых атомов (табл. 1). Температуру оболочки в процессе облучения измеряли хромель-англомелевыми термопарами, а температуру горючего определяли расчетом. Максимальная ошибка в определении величины температуры горючего в центре брикетов не превышала 200° С. Выгорание определяли γ -спектрометрическим или масс-спектрометрическим методом.

Распухание горючего во всех образцах, за исключением образцов, облучавшихся при линейной мощности более 400 вт/см, происходило без сдерживания оболочкой. Давление газа внутри образцов в конце облучения не превышало 30 кг/см².

Образцы исследовали микроскопическим методом. По фотографиям микроструктуры методом секущих [5] определяли суммарную пористость в нескольких участках по радиусу образца. Объемную долю пор диаметром более 0,8 мкм определяли на оптическом микроскопе, а долю пор диаметром 0,02—0,8 мкм — на электронном микроскопе методом реплик [6]. Вклад еще более мелких пор диаметром 15—32 Å рассчитывали по результатам исследования UO_2 методом трансмиссионной электронной микроскопии [7].

Результаты измерений

Результаты измерений пористости при разных выгораниях приведены на рис. 1. Там же для сравнения показана пористость необлученных образцов. По характеру зависимости пористости от выгорания и абсолютной величине пористости наблюдались три зоны с температурными интервалами 1000—1500; 1500—1700 и 1700—2500° С соответственно.

В зоне I пористость образцов, составлявшая до облучения 5—9%, уменьшилась после облучения до выгорания 1—5%. Эффект снижения был различен. Максимальное уменьшение пористости произошло у образцов, облученных до выгорания 1%, размеры зерен и исходных пор которых до облучения были минимальны. Пористость образцов, составлявшая ранее 5—7%,

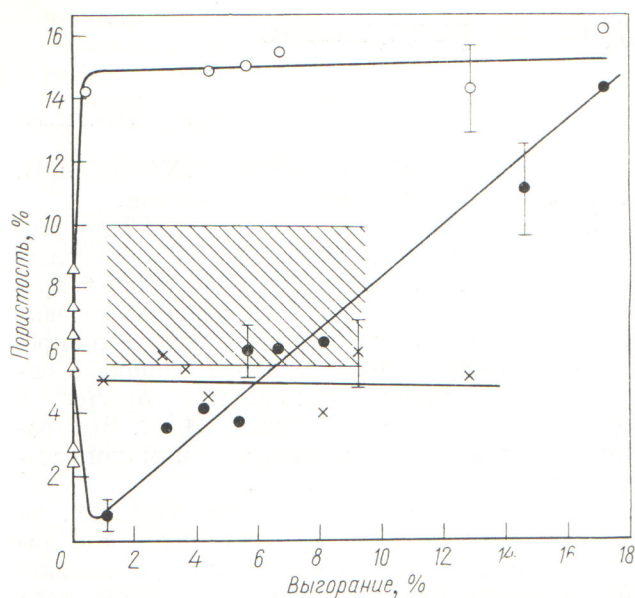


Рис. 1. Зависимость пористости от выгорания в различных температурных интервалах:

● — зона 1; ○ — зона 2, $dT/dr < 400^\circ \text{C/мм}$ (заштрихованная область — $dT/dr > 500^\circ \text{C/мм}$); × — зона 3; Δ — исходная пористость.

не изменилась после облучения до выгорания 6–7%, а после облучения до выгорания 14–17% увеличилась с 2–3 до 12–15%. Пористость облученных образцов линейно зависела от выгорания в пределах интервала ошибок измерения (15% относительных).

В зоне 2 величина пористости во всем исследованном интервале выгорания в пределах ошибки измерения зависела не от выгорания и исходной пористости, а только от градиента температуры. Абсолютная величина пористости в зоне 2 при величине градиента ниже 400°C/мм равнялась в среднем 15%, а при градиенте более 500°C/мм изменялась в пределах 5–10%. В зоне столбчатых зерен (зона 3) пористость была неравномерной. В центральной части, примыкающей к полости, пористость обычно была выше, однако среднее значение составило ~5%.

Обсуждение результатов

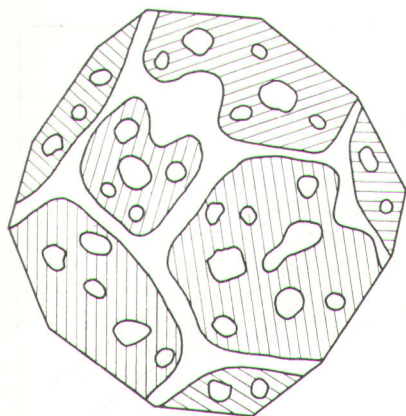
Уменьшение пористости в зоне 1 после облучения до выгорания ~1% может быть связано с двумя процессами: спеканием и заполнением пор твердыми продуктами деления. В образцах, облученных до выгорания 1%, пористость уменьшалась с 5 до 1%, в то время как объем

твердых продуктов деления при выгорании 1% составил меньше 0,7% объема горючего теоретической плотности [4]. Отсюда следует, что снижение пористости обусловлено спеканием. Данное заключение согласуется с результатами работы [8]. Увеличение пористости при более глубоких выгораниях связано с ростом размеров и объема пор вследствие накопления газа. Известно, что выделение газа из этой зоны в таблетках UO_2 с плотностью 10,0–10,7 г/см³ составляет от 20 до 50% при выгорании ~4% [9], в то время как из зон 2 и 3 выделение газа составляет ~100% при выгорании $\geq 1\%$. Рост пор происходит преимущественно на границах зерен. В образцах, у которых размер зон равнялся 15–20 мкм, заметная пористость отмечена и внутри зерен, на субграницах. Приращение пористости в зоне 1 для горючего с теоретической плотностью с учетом поправки на неравномерность выгорания по сечению образца в среднем равно 0,72% на 1% выгорания в исследованном интервале.

В зонах 2 и 3 наблюдалось насыщение изменений пористости уже при выгорании ~1%. Причину этого явления можно понять, проанализировав структуру горючего. Поры в этих зонах располагаются преимущественно по границам зерен и образуют сетку соединенных между собой каналов, которые расположены в основном на линиях соединений трех соседних зерен. При такой геометрии расположения пор значительная часть поверхности границ зерен соединена со свободной поверхностью, и газ, попавший на границу зерна, свободно выходит из горючего (рис. 2).

Внутризеренная пористость в зонах 2 и 3 также не увеличивается с ростом выгорания выше 1%, так как скорость выделения газа на границы зерен такова, что образовавшиеся атомы криптона и ксенона достигают границ зерен за время, соответствующее увеличению выгорания на 0,2%. Это подтверждено расчетом скорости движения газонаполненных пор в поле градиента температуры [10].

Эффект насыщения пористости с ростом выгорания должен быть и в зоне 1 вследствие перехода значительной доли изолированных газовых пор в открытую пористость. Насыщение пористости в зоне 1 не было достигнуто при выгорании 17%, что связано с низкой подвижностью газообразных осколков деления. По этой же причине можно предположить, что насыщение в зоне 1 будет достигаться постепенно от области с большей температурой к области с более низкой температурой.



Р и с. 2. Схема соединения пор на границах зерен.

Распухание горючего в исследованных образцах происходило при увеличивающемся давлении газа внутри оболочки (от 1—2 кг/см² в начале облучения до 30 кг/см² в конце облучения). Внешнее давление газа на горючее было недостаточным, чтобы существенно повлиять на изменение пористости, вызванное газовым распуханием. В образцах, облучавшихся при линейной мощности выше 400 Вт/см, оболочка могла в некоторой степени сдерживать распухание горючего в радиальном направлении. Однако по данным измерения пористости не обнаружено заметного влияния радиального сдерживания.

Зонная модель расчета измерений объема сердечников твэлов

Зонный характер зависимости изменений пористости от температуры и количественные данные об изменении объема горючего, вызванном твердыми и газообразными продуктами деления, позволяют рассчитать суммарный объемный эффект в сердечниках твэлов из окисного горючего. Если рассмотреть участок сердечника с внешним радиусом R достаточно малой длины l , чтобы изменением линейной мощности и температуры по его длине можно было пренебречь, и предположить, что выгорание не зависит от радиуса, то увеличение объема кольцевого слоя можно представить в следующем виде:

$$\Delta V_i = \pi l (\gamma_i^2 - \gamma_{i+1}^2) (C_i B + C_{i0}), \quad (1)$$

где C_i , C_{i0} — коэффициенты, характеризующие распухание в зоне, ограниченной радиусами r_i и r_{i+1} ; B — выгорание. Радиус r_i , соответ-

ствующий температуре T_i , для известных линейной мощности q_l , температуры на поверхности сердечника T_R и теплопроводности λ определяется из соотношения

$$r_i^2 = R^2 \left(1 - \frac{T_i \int_{T_R}^{T_i} \lambda(T) dT}{q_l} \right). \quad (2)$$

Относительное изменение объема выбранного участка сердечника определяется из соотношения

$$\Delta V/V = 4\pi/q_l \sum_{i=1}^n (C_i B + C_{i0}) \int_{T_i}^{T_{i+1}} \lambda(T) dT. \quad (3)$$

Количество зон зависит от распределения температуры. Если температура в центре не превышает 1700°С, расчет проводится для двух зон. Для более высокой температуры расчет выполняется по трехзонной модели.

Коэффициенты C_i , C_{i0} определяют соответственно зависящий и не зависящий от выгорания члены в соотношении (3). Величина коэффициентов C_i равна сумме изменения объема i -й зоны сердечника, которое вызывается твердыми и газообразными продуктами деления (ТПД и ГПД) при увеличении выгорания на 1%. Изменение объема, обусловленное ТПД, для всех зон одинаково и равняется ~0,4% [3], а по уточненным данным 0,32%. Изменение объема, вызванное ГПД, для первой зоны, как отмечалось выше, равно 0,72%, а для второй и третьей зон равно нулю, так как пористость не зависит от выгорания (см. рис. 1). После суммирования вкладов ТПД и ГПД получили значения коэффициентов C_1 , C_2 , C_3 .

Коэффициент $C_{1;0}$ равен произведению $K P_0$. Коэффициент радиационного спекания K определяет ту часть исходной пористости P_0 , которая исчезает вследствие спекания под облучением. Значения коэффициентов $C_{2;0}$ и $C_{3;0}$ равны разности пористости, соответствующей насыщению, и исходной пористости.

Значения коэффициентов C_i , C_{i0} Таблица 2

Коэффициент	Температурный интервал, °С			
	1000—1500	1500—1700		1700—2500
		$\frac{dT}{dr} < 400^\circ \text{С/мм}$	$\frac{dT}{dr} > 500^\circ \text{С/мм}$	
C_i	1,04	0,32	0,32	0,32
C_{i0}	$-K P_0$	$15 - P_0$	$7 - P_0$	$5 - P_0$

В табл. 2 приведены значения коэффициентов C_i и C_{i0} , применимые для области выгорания от 1 до 17%, исходной пористости от 2 до 10% и температуры от 1000 до 2500° С.

Подставив соответствующие величины C_i и C_{i0} , получим для двух зон:

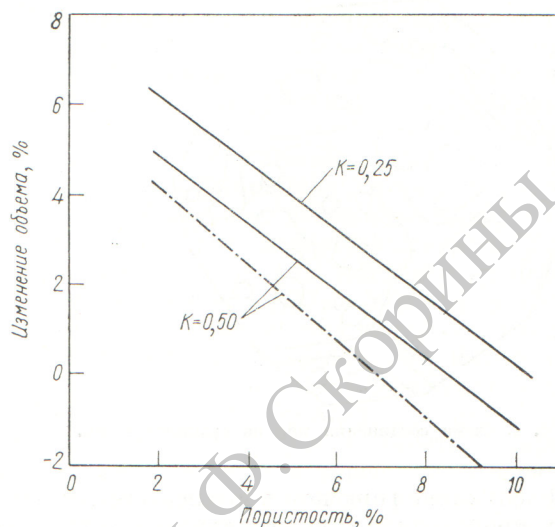
$$\begin{aligned} \frac{\Delta V \cdot 100\%}{V} = & 0,32B \left(\frac{100 - P_0}{100} \right) + \\ & + \frac{4\pi}{q_l} \left[(0,72B - KP_0) \int_{T_{\text{пов}}}^{1500} \lambda(T) dT + \right. \\ & \left. + (15 - P_0) \int_{1500}^{T_{\text{п}}} \lambda(T) dT \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

для трех зон:

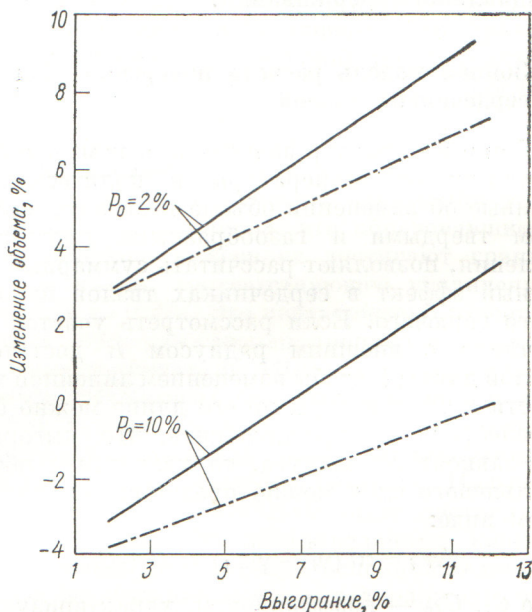
$$\begin{aligned} \frac{\Delta V \cdot 100\%}{V} = & 0,32B \left(\frac{100 - P_0}{100} \right) + \\ & + \frac{4\pi}{q_l} \left[(0,72B - KP_0) \int_{T_{\text{пов}}}^{1500} \lambda(T) dT + \right. \\ & + (7 - P_0) \int_{1500}^{1700} \lambda(T) dT + (5 - P_0) \int_{1700}^{T_{\text{п}}} \lambda(T) dT \left. \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Соотношения (3—5) применимы для сплошного сердечника, если внешнее давление не превышает 30 кг/см². На рис. 3 и 4 представлены результаты расчета изменений объема горючего при разной исходной пористости для выгорания 5 и 10% и значений линейной мощности 350 и 550 Вт/см. При расчете принималось, что коэффициент спекания равен 0,25 или 0,5 и температура на поверхности горючего 1000 или 1200° С. Исходная пористость, как видно из формул (4,5) и рис. 3 и 4, оказывается полезной для уменьшения объемных изменений во всех температурных интервалах. С ростом линейной мощности распухание уменьшается, так как уменьшается объемная доля сердечника зоны 1 и увеличивается объемная доля горючего в пластичной зоне 3, в меньшей степени подверженной газовому распуханию. Этот факт имеет важные следствия, поскольку деформация оболочки определяется в основном «жестким» периферийным слоем горючего.

Таким образом, методом количественной металлографии проведен анализ распределения пористости в сердечниках твзлов с горючим из UO_2 , $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$, облученных в интервале выгораний 0,4—17% и при линейной мощности 250—510 Вт/см. Качественно описаны меха-



Р и с. 3. Зависимость увеличения объема сердечника из двуокиси урана от пористости брикетов: — и — — — $T_{\text{пов}} = 1000$ и 1200°C ; $q_l = 350$ и 550 Вт/см соответственно.



Р и с. 4. Зависимость увеличения объема сердечника из двуокиси урана от выгорания ($K = 0,5$). Обозначения кривых те же, что на рис. 3.

низмы газового распухания и газовыделения в окисном горючем. Показано, что в зоне сердечника при выгорании $\sim 1\%$ и температуре выше 1500°C газовое распухание достигает насыщения. В зоне сердечника при температуре $< 1500^\circ\text{C}$ пористость увеличивается с выгоранием. Предложена зонная модель расчета изменений объема сердечника твэлов, учитывающая исходную пористость, выгорание и распределение температуры. Показано, что повышение исходной пористости и линейной мощности приводит к уменьшению распухания горючего.

Поступила в Редакцию 24/XII 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blaiberg M. e. a. In: Proc. IAEA Symp. «Radiation Damage in Reactor Materials». Venice, May 1962, p. 319.

2. Nelson R., Zebroski E. Trans. Amer. Nucl. Soc., 1966, v. 9, N 2, p. 412.
3. Лебедев И. Г. Кузьмин В. И., Пискун А. С. «Атомная энергия», 1970, т. 28, вып. 4, с. 351.
4. Frost B. Nucl. Appl. Technol., 1970, v. 9, N 2, p. 128.
5. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М., «Металлургия», 1970.
6. Вотинова В. В. и др. В сб.: Радиационная физика твердого тела и реакторное материаловедение. М., Атомиздат, 1970, с. 158.
7. Turnbull J., Cornell R. J. Nucl. Mater., 1970, v. 37, p. 335.
8. Bellamy R., Rich I. J. Nucl. Mater., 1969, v. 33, p. 64.
9. Лебедев И. Г. и др. Препринт НИИАР, П-166, 1972.
10. Лебедев И. Г., Кузьмин В. И. [6], с. 164.

Рецензии

Чесноков Н. И., Петросов А. А., Виноградов А. А. Оптимизация решений при разработке урановых месторождений. М., Атомиздат, 1974, 294, с., 1 р. 70 к.

Управление современным сложным предприятием, а именно таким, как правило, является горнорудное предприятие, может быть эффективным при использовании научных методов принятия решений. Это достаточно убедительно показано в рецензируемой книге, посвященной некоторым методическим вопросам принятия решений.

Описано весьма значительное число методов, применяемых при анализе сложных систем. Исходя из народно-хозяйственных задач разработки и внедрения АСУП, авторы вполне оправданно акцентируют внимание на математических методах.

Весьма последовательно авторы в стремлении иллюстрировать каждый из приводимых математических методов примерами функционирования горнорудных предприятий. Это, конечно, заслуживает всяческого одобрения, хотя возможен был бы и другой план построения материала, основанный на рассмотрении того или иного математического метода как средства решения конкретной задачи горнорудного предприятия.

В первой главе весьма кратко описывается применяемая авторами методология — системный подход. Далее анализируется математическая модель горнорудного предприятия. В этом разделе, как нам кажется, чрезмерно много внимания уделено понятию себестоимости. Сущность же ограничений, составляющих специфику рассматриваемого объекта, оказалась значительно меньше прокомментированной.

В следующих главах весьма интересно описаны математические методы, предназначенные для все более

усложняющейся ситуации. Так, в третьей главе обсуждаются вопросы выбора оптимальных решений в условиях определенности, а также метод перебора вариантов, линейное, нелинейное и динамическое программирования.

Четвертая глава посвящена выбору оптимальных решений в условиях неопределенности. В ней описываются некоторые идеи теории игр и массового обслуживания, стохастическое программирование. Наконец, в пятой главе обсуждаются еще весьма мало разработанные в научной литературе (с точки зрения практического приложения) вопросы многокритериальной оптимизации и выбора методов оптимизации.

Книга написана весьма доступным языком и снабжена многочисленными примерами, но она не свободна от недостатков. Так, при рассмотрении вопроса о выборе оптимальных решений в условиях неопределенности следовало бы отделить вероятностную ситуацию от неопределенной и ограничиться, на наш взгляд, только классом игр с природой.

Авторы без достаточных оснований отдали предпочтение критериям Вальда и Сэвиджа, опустив при рассмотрении другие игровые критерии, в частности критерии Лапласа и Гурвица. Интересно попытка авторов использовать при ранжировке критериев методы экспертных оценок, однако предлагаемая процедура нуждается в большем обосновании и экспериментальной проверке. При многоцелевой оптимизации остался без внимания наиболее перспективный путь определения оптимальных решений, связанный с определением множества Парето.

В целом же книга весьма полезна и с интересом будет встречена читателями.

ЧЕРНАВСКИЙ С. Я.