

УДК 621.039.531

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОТЕКАНИЯ ГЕЛИЯ В ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ РЕАКТОРОВ ВВЭР

В. В. Светухин, А. С. Кадочкин, В. Д. Рисованный
(Ульяновский ГУ; ГНЦ НИИАР, г. Димитровград)

Построена теоретическая модель, описывающая протекание гелия через порошок карбида бора в поглощающем элементе атомного реактора. При помощи разработанной модели на основании экспериментальных данных исследован характер протекания гелия и определен коэффициент проницаемости порошка карбида бора в отсутствие выгорания и после эксплуатации.

Ключевые слова: карбид бора, коэффициент проницаемости, выгорание.

Введение

Реактивность ядерного реактора изменяется путем перемещения в активной зоне элементов управления цепной реакцией — регулирующих стержней цилиндрической или другой формы, материал которых содержит вещества, сильно поглощающие нейтроны. В качестве поглощающего материала в поглощающих сборках реакторов ВВЭР-1000 используется порошок карбида бора естественного изотопного состава. Его поведение при облучении в решающей степени определяет функциональную способность поглощающих элементов (пэлов) и их ресурс. Карбид бора имеет уникальные свойства: высокую эффективность поглощения нейтронов, химическую стабильность, высокую температуру плавления, низкую плотность и низкую стоимость, что обусловило широкое его использование в стержнях системы управления и защиты ядерных реакторов различного типа.

Одним из факторов, ограничивающих функциональную способность пэлов на основе виброуплотненного порошка карбида бора, является повышенное газовое давление под оболочкой вследствие интенсивного выделения гелия из частиц порошка в результате реакций (n, α) на изотопе ^{10}B [1]. При больших сроках службы пэла оно может создавать существенные напряжения в оболочке и при определенных условиях может превысить критическое значение, определяемое прочностью оболочки и внешним давлением со

стороны теплоносителя, что, в свою очередь, приведет к деформации, разрушению и заклиниванию органов регулирования в направляющих каналах.

Проблеме поведения элементов управления и защиты атомных реакторов различных типов посвящено достаточно большое количество работ. Исследуются различные факторы, влияющие на функциональную способность пэлов. Так, например, в работах [2, 3] исследованы механические свойства оболочек пэлов реакторов различных типов. Имеется ряд работ, посвященных исследованию радиационной стойкости карбида бора (см. например, [4, 5]), микроструктурных изменений [6]. Достаточно широко представлены исследования термодесорбции радиогенных газов — гелия и трития — из облученного порошка карбида бора [5, 7, 8]. В настоящее время, однако, отсутствует методика расчета распределения давления гелия под оболочкой пэлов как в номинальных, так и в аварийных режимах эксплуатации.

Одной из актуальных задач, которую необходимо решить при создании математической модели пэла, является нахождение распределения давления вышедшего под оболочку гелия, образовавшегося в процессе поглощения нейтронов, и изменение его в процессе облучения. Для решения данной задачи необходимо определить механизм просачивания гелия через порошок карбида бора, а также физические параметры, харак-

теризующие этот процесс при различных значениях выгорания. Решению данной проблемы посвящена настоящая работа.

Описание эксперимента

Для определения параметров протекания газа через порошок карбида бора в отсутствие выгорания авторами был проведен модельный эксперимент. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Экспериментальная установка представляла собой два баллона с манометрами, соединенных между собой трубкой с виброуплотненным порошком карбида бора. Между первым баллоном и трубкой был расположен отсеочный вентиль. Трубка, моделирующая пэл, заполнена порошком карбида бора с известной насыпной плотностью. Для предотвращения попадания частиц порошка в баллоны трубка с обоих концов порошковой засыпки снабжена разделителями из никелевой сетки с очень большой газопроницаемостью, размер которых много меньше длины трубки. Воздух из баллонов и трубки с порошком откачивался с помощью форвакуумного насоса, затем баллоны заполнялись техническим гелием до различ-

ных давлений при закрытом вентиле, после чего вентиль открывался и регистрировалась зависимость изменения давления в баллонах от времени.

К настоящему времени авторами выполнен также большой цикл работ по исследованию пэлов с порошком карбида бора реакторов ВВЭР-1000, отработавших различное время на Калининской и Балаковской АЭС (табл. 1). Накопленный опыт исследований отработавших в реакторах поглощающих стержней системы управления и защиты (ПС СУЗ) позволяет выявить основные физические процессы, происходящие в пэлах при их эксплуатации.

Исследование параметров просачивания гелия через порошок карбида бора производилось путем прокалывания оболочки пэла. Давление гелия и объем газосборника определялись манометрическим методом прокола оболочки в месте расположения газосборника пучком лазера с помощью стандартной методики. В момент прокола оболочки скачкообразно выделялось некоторое количество газа, а затем, по мере выдержки, гелий, просачиваясь через порошковый сердечник, постепенно выходил в измерительную систему, причем скорость натекания уменьшалась с течением времени. Измерения объема выделившегося при проколе оболочки гелия проводились для двух пэлов, функционирующих в режиме аварийной защиты, и трех пэлов в режиме автоматического регулирования.

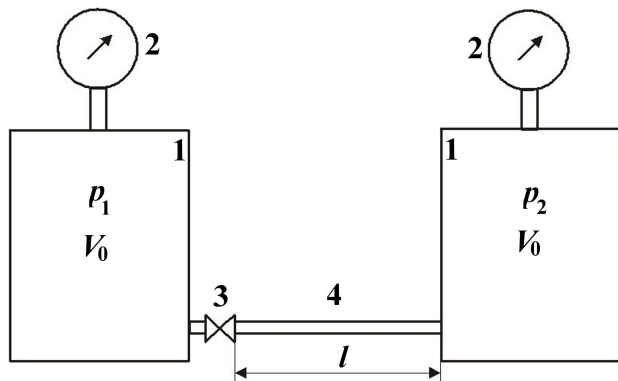


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — баллоны объемом V_0 ; 2 — манометры ($p_1 > p_2$); 3 — клапан; 4 — трубка с порошком

Основные уравнения

Для описания просачивания газа через пористую среду применяется уравнение фильтрации Дарси, записываемое в одномерном случае в виде [9]

$$\frac{K}{\eta} \frac{\partial}{\partial x} \left[(p + b) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \gamma = \varphi \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (1)$$

Таблица 1

Основные характеристики исследованных пэлов

Характеристика пэла	Время облучения в реакторе	
	календарные сутки	эффективные сутки
АЗ Калининской АЭС	2 464	1 804
АР Балаковской АЭС	680	551

где p — давление газа; η — вязкость газа; φ — пористость порошка; K — проницаемость порошка; b — константа скольжения; $\gamma = \gamma(x, t)$ — газовыделение в единице объема в единицу времени.

В условиях рассматриваемого эксперимента выделение газа $\gamma(x, t)$ равно нулю. Кроме того, полагалось, что течение газа по трубке является вязким без скольжения, т. е. $b = 0$. В этом случае уравнение (1) упрощается и принимает вид

$$a \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \varphi \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

где $a = K/(\varphi\eta)$.

Начальное условие имеет вид $p(x, 0) = p_0$. Граничные условия определяются геометрией задачи.

В случае модельного эксперимента по прохождению гелия через трубку с порошком карбида бора граничные условия записываются как

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t}(0, t) &= -\frac{K}{\varphi\eta l} p(0, t) \frac{\partial p(0, t)}{\partial x}; \\ \frac{\partial p}{\partial t}(l, t) &= -\frac{K}{\varphi\eta l} p(l, t) \frac{\partial p(l, t)}{\partial x}, \end{aligned}$$

что отражает тот факт, что массовый расход газа через границу *баллон—трубка* зависит от объема баллона и давления в нем.

При моделировании эксперимента по проколу пэла после эксплуатации использовались граничные условия другого вида. Первое граничное условие $\frac{\partial p}{\partial x}(0, t) = 0$, что означает отсутствие течения у нижнего конца пэла. Второе граничное условие определялось из условия сохранения массы газа в замкнутом объеме:

$$\varphi S \int_0^L p(x) dx + p(L, t) = p_0 (\varphi S L + V_g),$$

где S — площадь поперечного сечения сердечника; L — длина порошкового сердечника; V_0 и V_g — объемы измерительной системы и газосборника пэла. В данном эксперименте использовались следующие значения этих величин: $S = 0,38 \text{ см}^2$; $L = 370 \text{ см}$; $V_0 = 140,23 \text{ см}^3$.

Объем $V(t)$ вышедшего газа при нормальных условиях определялся с помощью соотношения

$$\frac{p(L, t) (V_0 + V_g)}{T} = \frac{p_{\text{атм}} V(t)}{T_0},$$

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление, равное 10^5 Па , $T_0 = 273,15 \text{ К}$.

Численный расчет. Обсуждение результатов

Нелинейное дифференциальное уравнение (2) решалось численно для обоих типов граничных условий при следующих значениях входящих в него величин: $\eta = 1,95 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $T = 293 \text{ К}$; $\varphi = 0,305$, что соответствует средней насыпной плотности порошка карбида бора, равной $1,775 \text{ г/см}^3$. Коэффициент K проницаемости гелия определялся методом сравнения расчетных и экспериментальных данных как для модельного эксперимента по просачиванию гелия через трубку, так и для эксперимента по проколу пэла. Путем варьирования значения K добивались минимизации суммы квадратов отклонений расчетных и экспериментальных значений объема вышедшего гелия.

При моделировании эксперимента по прохождению гелия через трубку с порошком карбида бора было получено значение проницаемости $K = (3,50 \div 7,45) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$. Для пэлов, функционирующих в режиме аварийной защиты (табл. 2), порядок величины K составляет 10^{-14} м^2 , для пэлов в режиме автоматического регулирования — 10^{-13} м^2 . В связи с этим нужно отметить следующее. С одной стороны, порошок в процессе эксплуатации подвержен спеканию, поэтому проницаемость порошка пэлов, функционирующих в режиме автоматического регулирования и находящихся в активной зоне реактора, со временем должна уменьшаться. Пэлы, функционирующие в режиме аварийной защиты, находятся вне активной зоны реактора, поэтому порошок в них подвержен спеканию в гораздо меньшей степени и его проницаемость должна меняться значительно слабее. С другой стороны, время использования пэлов аварийной защиты (см. табл. 1) в несколько раз превышает время использования пэлов автоматического регулирования, что позволяет, по мнению авторов, сделать вывод о правдоподобности полученного результата.

Коэффициент проницаемости K можно также оценить теоретически. Согласно теории проницаемости Козени—Кармана [9]

$$K = B \frac{\varphi^3}{(1 - \varphi) S_p^2}, \quad (3)$$

где S_p — удельная поверхность порошка; B — константа Козени, принятым значением которой является $B = 0,2$ [9]. Предполагая, что части-

Результаты исследования выхода гелия после прокола оболочки

Характеристика пэла	Давление гелия в газосборнике до прокола, атм.	$K \cdot 10^{14}$, м^2
АЗ 4	2,98	3,9
АЗ 14	2,55	3,5
АР 4	1,84	13,0
АР 9	1,62	25,0
АР 18	1,41	19,5

цы порошка имеют сферическую форму и одинаковый диаметр, равный 5 мкм [10, 11], удельную поверхность сердечника можно представить в виде

$$S_p = \frac{6(1 - \varphi)}{d}, \quad (4)$$

где d — средний диаметр частиц порошка. Тогда из (3), (4) получим

$$K = B \frac{\varphi^3 d^2}{36(1 - \varphi)^3}. \quad (5)$$

Если для оценки принять использованное значение пористости $\varphi = 0,305$, а диаметр частиц порошка $d = 10$ мкм, то для проницаемости получим значение $K = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, которое по порядку величины совпадает с экспериментальным значением проницаемости, полученным для пэлов, функционировавших в режиме аварийной защиты, а также со значением проницаемости, определенным из модельного эксперимента для необлученного порошка.

На рис. 2, 3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости, полученные для модельного эксперимента и для эксперимента по

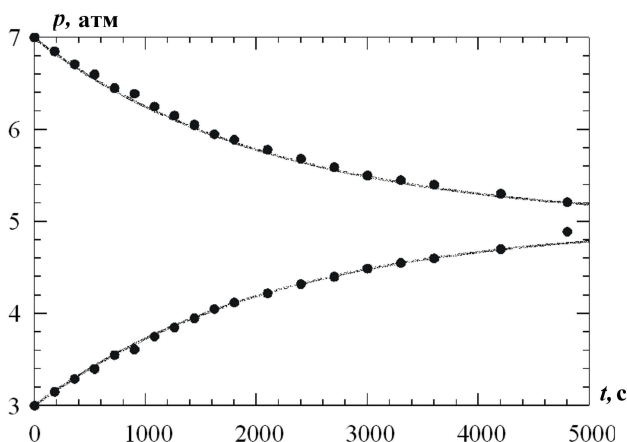


Рис. 2. Зависимость давления в баллонах (см. рис. 1) от времени: — — расчет; • — эксперимент

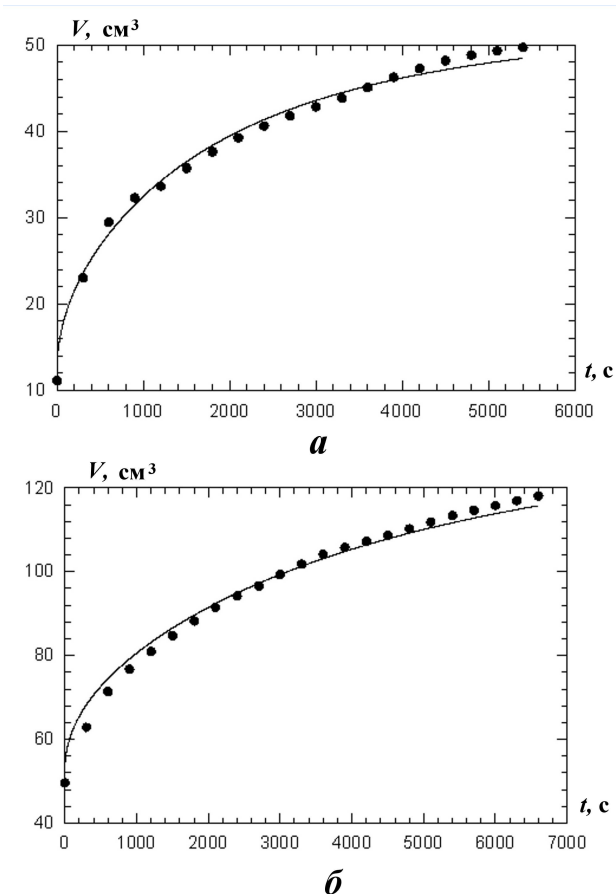


Рис. 3. Объем вышедшего газа: а — пэл АР 18; б — пэл АЗ 4; — — расчет; • — эксперимент

проколу оболочки пэла соответственно. Видно, что экспериментальные и расчетные зависимости совпадают с хорошей точностью: относительная погрешность во всех случаях не превышает 3–4 %.

Заключение

Таким образом, с помощью уравнения фильтрации Дарси оказалось возможным описать просачивание гелия через порошок сердеч-

ник пэла и определить газопроницаемость сердечника. При помощи численного моделирования с использованием экспериментальных данных была определена проницаемость порошка карбида бора при отсутствии выгорания (модельный эксперимент), а также для пэлов, функционирующих в режимах автоматического регулирования и аварийной защиты. Было показано, что протекание гелия через порошок карбида бора является преимущественно вязким, а ролью других механизмов можно пренебречь. Следует отметить, что значения проницаемости K , полученные при моделировании двух независимых экспериментов, совпадают по порядку величины как между собой, так и с теоретической оценкой, полученной из теории Козени—Кармана. Это позволяет считать полученные значения проницаемости достаточно надежными.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. *Zaharov A. V., Risovaniy V. D., Fridman S. R. et al.* Irradiation behavior of boron carbide reactors WWER-1000 // Proc. of Technical Committee Meeting "Control Assembly Materials for Water Reactors: Experience, Performance and Perspectives". 1998. Vienna: IAEA, 2000. TECDOC-1132. P. 167—174.
2. *Massih A. R., Isaksson P., Stahle P.* Modelling the behaviour of a control-element blade during irradiation // Computers and Structures. 1997. Vol. 64, No 5—6. P. 1113—1127.
3. *Рисованный В. Д., Захаров А. В., Клочков Е. П., Гусева Т. М.* Бор в ядерной технике. Димитровград: ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, 2003.
4. *Климов В. Д., Тарасиков В. П.* Влияние облучения на структуру карбида бора. Обнинск: ФЭИ, 1983.
5. *Suzuki H., Maruyama I., Wakasa T.* Postirradiated annealing of boron carbide pellet irradiated in fast breeder reactor // J. Nucl. Sci. Tech. 1979. Vol. 16. P. 588—589.
6. *Kryger B., Chotard A., Herter P.* Behavior of PWR type B_4C irradiated at high capture rate // Proc. of Technical Committee Meeting "Advances in Control Assembly Materials for Water Reactors". Vienna, 29 November — 2 December, 1993, Vienna: IAEA, 1996. TECDOC-813. P. 37—49.
7. *Ковыршин В. Г.* Выделение гелия при нагреве облученного карбида бора // Атомная энергия. 1982. Т. 53. Вып. 2. С. 112—113.
8. *Schnarr K., Münzel H.* Release of tritium from boron carbide irradiated with reactor neutrons // J. Nucl. Mat. 1990. Vol. 170 (3). P. 253—260.
9. *Шейдеггер А. Э.* Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1960.
10. *Tanaka K., Suzuki M., Kojima M., Akimoto Y.* Preparation of B_4C compact // Summary Report Meeting of Specialists on Development and Application of Absorber Materials. Dimitrovgrad: RIAR, 1973. P. 159—176.
11. *Остапенко И. Т., Слёзов В. В., Тарасов Р. В. и др.* Уплотнение карбида бора при горячем прессовании // Порошковая металлургия. 1979. № 5. С. 38—43.

Статья поступила в редакцию 15.08.11.