

УДК 621.039.531

В. В. Светухин, А. С. Кадочкин, П. Ф. Салих-Заде, В. Д. Рисованный

ВЫХОД ГЕЛИЯ ИЗ ОБЛУЧЕННОГО ПОРОШКА КАРБИДА БОРА ПОД ОБОЛОЧКУ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Предложена модель для расчета изменения давления гелия, вышедшего из облученного порошкового карбида бора под оболочку пэл во времени по высоте пэл. Определены параметры модели: просачиваемость порошка карбида бора, энергия активации центров накопления гелия. Проведено моделирование поведения пэл в условиях проектной аварии типа LOCA. Найдено соотношение критических параметров «температура–время» воздействия, определяющих безопасный режим эксплуатации пэлов.

Введение

Согласно требованиям безопасного эксплуатирования ядерных реакторов, органы защиты и регулирования должны сохранять в заданных пределах эффективность поглощения нейтронов, целостность и форму для свободного перемещения в направляющих каналах и гильзах. Недопустимо разрушение, деформация и заклинивание органов регулирования в направляющих каналах, что может явиться следствием распухания поглотителя под воздействием реакторного облучения, взаимодействия его с теплоносителем, избыточного газового давления, перегрева и т.п. Поэтому одним из факторов, ограничивающих работоспособность поглощающих элементов 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 . 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. До недавнего времени отсутствовала методика расчета распределения давления гелия под оболочкой пэлов как в номинальных, так и в аварийных режимах эксплуатации.

В настоящее время в реакторах ВВЭР в качестве поглощающего элемента широко используется порошок карбида бора. Поглощающим изотопом является ^{10}B , который поглощает нейтроны по (n, α) реакции.

При эксплуатации реактора стержень находится над активной зоной реактора, поэтому происходит неравномерное выгорание ^{10}B по высоте стержня. Выгорание ^{10}B внизу стержня может достигать 50–75 %, в то время как на высоте 50 см от нижнего конца стержня выгорание практически отсутствует [1]. Неравномерное выгорание вызывает неравномерный по высоте выход гелия под оболочку. В условиях эксплуатации пэла в номинальном режиме в газосборник выходит только 4 % образовавшегося гелия [1, 2], в то время как остальной гелий удерживается в объеме зерен порошка карбида бора.

В условиях проектной аварии возможен значительный разогрев пэла, который приводит к выходу гелия под оболочку. Давление, создаваемое газом под оболочкой, является одним из факторов, лимитирующих работу пэлов.

Для выбора критериев работоспособности пэла необходимо знать распределение в нем давления по высоте как в номинальных условиях эксплуатации, так и в условиях проектных аварий. Данная работа посвящена разработке математической модели, позволяющей рассчитывать давление газа в любой точке поглощающего элемента. Проведено моделирование поведения пэла в условиях проектной аварии типа LOCA.

Расчетная модель

Основные уравнения. Для описания просачивания газа через пористый сердечник пэла в измерительную систему использовалось уравнение фильтрации Дарси, газ при этом считался идеальным, коэффициент проницаемости и пористость порошка считались постоянными вдоль пэла. Кроме того, было сделано предположение о том, что течение газа сквозь порошок карбида бора является вязким. В рамках принятых допущений уравнение Дарси имеет следующий вид:

$$\frac{RT}{M} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\eta} \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \gamma = \varphi \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (1)$$

где ρ – плотность газа; η – вязкость газа; T – температура; M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; K – коэффициент проницаемости; φ – пористость порошка карбида бора; γ – газовыделение. В данной работе температура T считается известной функцией времени и задается в предположении, что температуры газа и порошка равны. В этом случае уравнение состояния газа имеет вид

$$p(x,t) = \frac{RT(t)}{M} \rho(x,t). \quad (2)$$

В качестве зависимости вязкости гелия от температуры взято соотношение, наиболее часто применяющееся в технических расчетах [3]:

$$\eta(x,t) = \eta_0 \left(\frac{T(x,t)}{T_0} \right)^\lambda, \quad (3)$$

где $\eta_0 = 1,86 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T_0 = 273,15$ К, $\lambda = 0,6722$.

Поскольку при выгорании 1 г изотопа ^{10}B образуется 0,4 г гелия, то зависимость $\gamma(x,t)$, описывающая газовыделение в единице объема порошка в единицу времени, определяется следующим выражением [4, 5]:

$$\gamma(x,t) = 0,4\alpha(1-\varphi)\rho_B G(x) \frac{dy}{dt}, \quad (4)$$

где $\alpha = 0,1435$ – естественное содержание изотопа ^{10}B ; ρ_B – плотность массивного карбида бора; $G(x)$ – выгорание изотопа ^{10}B ; y – доля гелия, вышедшего в межзеренное пространство, определяемая уравнением

$$\frac{dy}{dt} = (1 - y)g(T), \quad (5)$$

где

$$g(T) = g_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где E_a – энергия активации; g_0 – кинетический параметр. Тогда решением уравнения (5) является

$$y = 1 - \exp\left[-g_0 t \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)\right]. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (2) при использовании решения уравнения (1) и выражений (3)–(6) позволяет определить давление гелия в произвольной точке пэла в любой момент времени. Решение задачи по расчету изменения температуры и давления гелия вдоль стержня СУЗ реализовано в специально разработанной компьютерной программе. При создании расчетного блока для решения уравнений в частных производных использовали метод конечных элементов.

Параметры модели. Для определения коэффициента проницаемости порошка карбида бора был проведен ряд экспериментов с отработавшими определенное время поглощающими элементами. Исследование параметров просачивания гелия через порошок карбида бора производилось путем прокалывания оболочки поглощающего элемента. Измерения объема, выделившегося при проколе оболочки гелия, проводили для двух пэлов, работавших в режиме аварийной защиты, и трех пэлов, работавших в режиме автоматического регулирования. На рисунке 1 приведена зависимость объема вышедшего газа от времени. Уравнение (1) решалось численно, при этом коэффициент проницаемости K определялся из условия наилучшего совпадения экспериментальных зависимостей и зависимостей, полученных при решении уравнения (1). Коэффициент проницаемости составил для пэлов, работавших в режиме аварийной защиты, величину $K = 3,5 - 4,0 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, а для пэлов, работавших в режиме автоматического регулирования, $K = 1,3 - 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$.

Для проведения расчетов по предложенной выше методике необходимо знать информацию о параметрах центров накопления гелия: E_a и g_0 . В работе [6] был предложен метод, позволяющий получать эти параметры из экспериментальной зависимости скорости термодесорбции от температуры при линейном нагреве [7]. Предложенная в работе [6] модель дает следующие выражения для скорости термодесорбции dN/dT и кинетического параметра g_0 :

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dT} = & N(T_0) \frac{E_a}{k T_{\max}^2} \exp\left\{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T}\right)\right\} \times \\ & \times \exp\left\{-\frac{E_a T}{k T_{\max}^2} \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right\} \times \end{aligned} \quad (7)$$

$$\times \exp \left\{ \frac{E_a^2}{k^2 T_{\max}^2} Ei(1, E_a / kT) \exp \left(\frac{E_a}{kT_{\max}} \right) \right\}, \quad (7)$$

$$g_0 = \beta \frac{E_a}{kT_{\max}} \exp \left(\frac{E_a}{kT_{\max}} \right),$$

где T_{\max} – температура максимума; $Ei(1, x)$ – функция Эйри; β – скорость нагрева. Выражение (7) наиболее удобно для описания эксперимента, т.к. температуру максимума несложно определить по экспериментальным данным, даже в случае близлежащих максимумов, единственным подгоночным параметром при этом будет энергия активации.

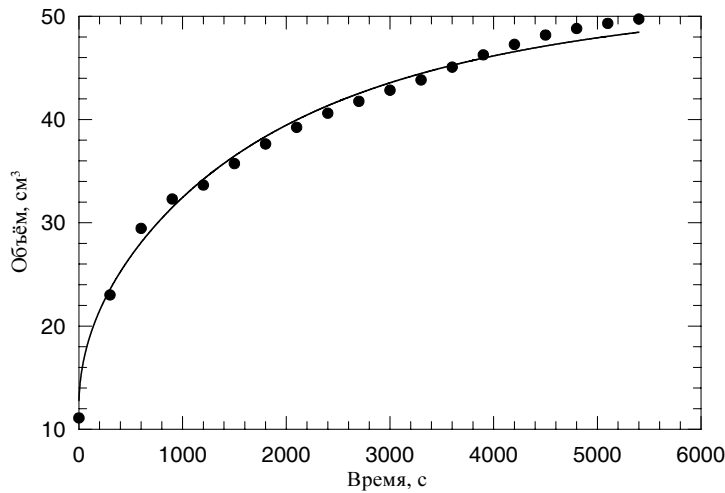


Рис. 1 Эксперимент по проколу пэла. Зависимость объема вышедшего гелия от времени

Решение уравнения (7) имеет два максимума – один при температуре 100–150 °С, а второй – при температуре 800–1000 °С. Пик, наблюдающийся при более низкой температуре (100–150 °С), удовлетворительно описывается формулой (7) с $E_a = 0,23$ эВ (дефект типа А). Высокотемпературный пик (800–1000 °С) имеет сложную структуру и удовлетворительно описывается в предположении, что состоит из двух пиков с энергиями активации $E_a = 0,65$ эВ и $E_a = 0,75$ эВ (дефекты типа В и С, соответственно). Близкие значения энергии активации и близкий температурный интервал разрушения дефектов типа В и С позволяют сделать предположение об их родственной структуре. Скорее всего, эти центры имеют одинаковый состав, но различаются размером или пространственным расположением. В этом предположении можно не разделять центры накопления гелия В и С и говорить о дефектах одного типа, характеризующегося энергией активации, лежащей в диапазоне 0,65–0,75 эВ. Значение кинетического параметра g_0 для низкотемпературного центра типа А составляет согласно выражению (7) $1,1 \text{ с}^{-1}$, а для центров В и С лежит в диапазоне $1,5\text{--}2,0 \text{ с}^{-1}$.

Моделирование проектной аварии типа LOCA

Созданная программа использовалась для расчета изменения давления гелия вдоль поглощающего сердечника при аварийном нагреве пэла, в случае потери теплоносителя (максимальная проектная авария типа LOCA). Предполагалось, что СУЗ сброшены, и реактор заглушен. Однако топливные сборки разогреваются из-за остаточного энерговыделения, тем самым нагревая пэл.

По имеющимся литературным данным, температура на поверхности твэла реактора ВВЭР при аварии с потерей теплоносителя составляет величину порядка 600 градусов [8], при проведении расчетов поэтому полагалось, что выделение гелия связано с центрами *B* и *C*, а низкотемпературный центр типа *A* вклада в газовыделение не вносит. Очевидно, что для поверхности пэла указанная температура является завышенной, и данный режим можно использовать как модельный для достаточно консервативной оценки.

Поскольку максимальное выгорание и, следовательно, газовыделение из порошка соответствуют нижней части пэла, то и максимальное давление также будет на дне пэла. Полученные в расчетах результаты зависимости максимального давления от времени, прошедшего с начала аварии, приведены рисунке 2, из которого видно, что при постоянной температуре давление гелия под оболочкой пэла растет линейно, что обусловлено слабой зависимостью газовыделения γ от времени. При уменьшении температуры давление также резко уменьшается. Это связано с тем, что в данной модели теплопроводность порошка карбида бора считается достаточно большой, что приводит к тому, что температура меняется одновременно по всему объему пэла. Со снижением максимальной температуры нагрева облученных пэлов в аварийном режиме величина максимального давления под оболочкой пэла существенно уменьшается. Это связано с тем, что гелий за время аварии не успевает полностью выйти из гранул порошка.

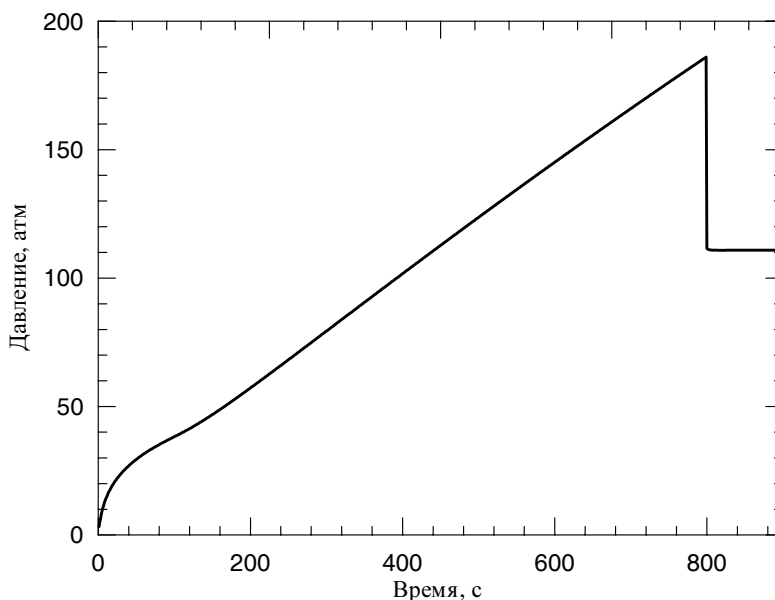


Рис. 2 Зависимость давления гелия на дне пэла от времени в условиях проектной аварии типа LOCA

При нормальных условиях эксплуатации через каналные трубы, в которых находятся пэлы, протекает теплоноситель (вода) со скоростью 2 м/с, давление воды составляет примерно 15 МПа, при температуре около 300 °С. Поэтому величину 15 МПа можно считать критическим значением давления внутри пэла. Согласно произведенным расчетам (рис. 2), давление на дне пэла при достаточно большом времени аварии может существенно превышать 15 МПа. Нами была определена зависимость времени от температуры при котором достигается критическое значение 15 МПа. Согласно численным расчетам, эта зависимость удовлетворительно описывается эмпирической формулой:

$$t = 2,776 T^{-6,71}. \quad (8)$$

Данная зависимость позволяет определить безопасное время воздействия высокой температуры на пэл, которое по расчетам составляет величину от порядка одной минуты при температуре 900 °С до получаса при температуре порядка 500 °С.

Заключение

В данной работе при помощи численного моделирования с использованием экспериментальных данных нами была определена проницаемость порошка карбида бора для пэлов АЗ и АР, определены параметры, характеризующие выход гелия из зерен порошка карбида бора при различных температурах. Кроме того, найдено соотношение критических параметров «температура – время воздействия», определяющих безопасный режим эксплуатации пэлов.

Список литературы

1. **Щербак, В. И.** Радиационные повреждения в облученном нейтронами карбиде бора / В. И. Щербак, В. Н. Тарасиков, В. Н. Быков, В. А. Руденко // Атомная энергия. – 1986. – Т. 60. – Вып. 3.
2. **Суслов, Д. Н.** Развитие модели проницаемости гелия через порошковый сердечник ПЭЛ / Д. Н. Суслов, А. В. Захаров, Д. В. Певцов // Физическое моделирование изменения свойств материалов в номинальных и аварийных условиях : сборник рефератов докладов Троицкого семинара КНТС РМ (Троицк, апрель 2000 г.). – Троицк, 2000.
3. **Голубев, И. Ф.** Вязкость газов и газовых смесей / И. Ф. Голубев. – М. : Физматгиз, 1959.
4. **Певцов, Д. В.** Исследование газовой выделенности и определение газопроницаемости виброуплотненного сердечника поглощающего элемента на основе карбида бора / Д. В. Певцов, С. Р. Фридман // Сборник трудов НИИАР. – Вып. 4. – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 2003. – С. 44–52.
5. **Певцов, Д. В.** Моделирование распределения давления гелия под оболочкой в поглощающих элементах ВВЭР-1000 / Д. В. Певцов, А. В. Захаров // Физическое моделирование изменения свойств материалов в номинальных и аварийных условиях : сборник рефератов докладов семинара КНТС РМ (Обнинск, апрель 2002 г.). – Обнинск : ГНЦ РФ ФЭИ, 2003.
6. **Светухин, В. В.** Определение энергетических параметров центров накопления гелия в облученном карбиде бора по спектрам термодесорбции / В. В. Светухин // Письма в журнал технической физики. – 2002. – Т. 29. – № 4.
7. **Ковыршин, В. Р.** Выделение гелия при нагреве облученного карбида бора / В. Р. Ковыршин // Атомная энергия. – 1982. – Т. 53. – Вып. 2.

8. **Кобылянский, Г. П.** Состояние экспериментальных ТВС типа ВВЭР после реакторных испытаний в режимах моделирующих аварий с потерей теплоносителя / Г. П. Кобылянский, В. М. Махин, В. Н. Шулимов // Сборник докладов IV межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград : НИИАР, 1996.