

УДК 621.039.548:621.039.524.4-98

Газовыделение из негерметичного твэла после остановки реактора

Ишеничников Б.В.

В процессе эксплуатации ядерных реакторов наблюдаются случаи разгерметизации твэлов, приводящие к загрязнению коммуникаций и оборудования первого контура реактора радиоактивными продуктами деления. В этой связи определенный интерес представляет изучение механизма выхода продуктов деления из-под оболочки негерметичного твэла в теплоноситель во время работы реактора и после его остановки.

Изучение выхода продуктов деления из негерметичных твэлов во время работы реактора достаточно полно освещено в работах [1—4]. В остановленном реакторе процесс деления отсутствует. Низкая температура горючего практически исключает выход осколков из горючего под оболочку за счет диффузии. Специфика условий расхолаживания реактора значительно усложняет эксперименты по изучению выхода продуктов деления из негерметичных твэлов. Наибольшее осложнение вызывает нестационарность происходящих процессов (температуры и давления).

Поэтому представляется целесообразным анализ математической модели выхода газообразных продуктов из негерметичного твэла в теплоноситель после остановки реактора.

Основные допущения. Процессы газовыделения рассмотрены применительно к гипотетическому стержневому керамическому твэлу в активной зоне остановленного реактора с водяным теплоносителем. Длина твэла L , диаметр d , зазор между окисным горючим и оболочкой h , расстояние от места дефекта до конца твэла произвольно и равно l . Предполагается, что $L \gg d$ и $l \gg d$. Это условие позволяет свести задачу к одномерной. Принято, что дефект образовался во время работы реактора и под оболочкой к моменту остановки находится парогазовая смесь при рабочем давлении реактора. После остановки реактора давление в нем снижается до атмосферного. Предполагается, что температура парогазовой смеси под оболочкой твэла по мере снижения давления все время остается выше температуры насыщения, т. е. водяной пар не конденсируется.

Основной интерес представляет приближенная оценка времени запаздывания выравнивания давления на закрытом конце твэла и обще-

го количества газа, оставшегося в зазоре под оболочкой твэла после сброса давления в реакторе. Поместим начало координат в место дефекта, тогда закрытый конец твэла будет на расстоянии l от начала координат.

Дифференциальное уравнение газовыделения. В дальнейшем понятие «газ» применяется к парогазовой смеси. При сделанных выше допущениях движение газа под оболочкой твэла можно рассматривать как движение сжимаемой жидкости в капиллярно-пористом теле; такое движение — достаточно медленное, поэтому температура газа всегда практически равна температуре стенок капилляра, и процесс будет изотермическим.

По закону Дарси поток через капиллярно-пористое тело связан с градиентом давления соотношением

$$J = -\frac{K}{\mu} \text{grad } P, \quad (1)$$

где K — коэффициент проницаемости; μ — коэффициент динамической вязкости; P — давление под оболочкой твэла.

Для газов скорость изменения плотности описывается выражением [5]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \Pi) = -\text{div}[\rho J], \quad (2)$$

где ρ — плотность газа (при давлении); Π — пористость; τ — время.

Используя зависимость (1) и уравнение состояния идеальных газов при изотермическом процессе, получаем

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{K}{\mu \Pi} \text{div} [P \text{ grad } P] \quad (3)$$

или для одномерного случая

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{K}{\mu \Pi} \frac{\partial}{\partial x} \left[P \frac{\partial P}{\partial x} \right]. \quad (4)$$

После преобразования и перехода к функции P^2 находим уравнение течения газа под оболочкой твэла

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (P^2) = \frac{KP}{\mu \Pi} \frac{\partial^2}{\partial x^2} (P^2). \quad (5)$$

Полученное уравнение является нелинейным и в общем виде не решается. Нелинейность связана с изменением разности давления вне и внутри твэла по мере выхода газа из-под обо-

лочки. При выводе уравнения дополнительное сопротивление дефекта не учитывалось, так как предполагалось, что площадь дефекта больше или равна проходному сечению свободного пространства под оболочкой твэла.

Решение уравнения. Очевидно, чем больше давление под оболочкой твэла, тем больше скорость истечения газа и тем меньше время запаздывания выравнивания давления на дальнем конце твэла с внешним давлением в реакторе. Если величину P , входящую в коэффициент для правой части уравнения, принять равной давлению в реакторе P_c , то время запаздывания окажется больше реального. При постоянстве P_c уравнение (5) — линейное относительно функции P^2 и может быть решено в общем виде операционным методом с применением интегрального преобразования Лапласа. Граничные условия должны отражать в этом случае постоянство внешнего давления на месте дефекта и отсутствие источников газа на закрытом конце твэла, т. е.

$$P^2(0, \tau) = P_c \text{ и } \frac{\partial}{\partial x} P^2(l, \tau) = 0. \quad (6)$$

Начальное условие отражает равенство давления P под оболочкой твэла и в реакторе (P_0)

$$P^2(x, 0) = P_0^2. \quad (7)$$

Если под P_c понимать конечное (т. е. атмосферное) давление в реакторе, то задача будет отражать условия мгновенного сброса давления в реакторе от рабочего P_0 до атмосферного.

В этом случае решение уравнения (5) при краевых условиях (6) и (7) для закрытого конца твэла будет иметь вид

$$P^2(l, \tau) = P_c^2 + \frac{4}{\pi} (P_0^2 - P_c^2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \times \exp \left\{ - \frac{(2n-1)^2 \pi^2 P_c K \tau}{4 \Pi \mu l^2} \right\}. \quad (8)$$

При значении критерия Фурье F_0 в экспоненте, большем или равном 0,5, можно ограничиться одним первым членом бесконечного ряда [6]. Тогда выражение (8) упрощается:

$$P^2(l, \tau) = P_c^2 + \frac{4}{\pi} (P_0^2 - P_c^2) \cdot \exp \left(- \frac{\pi}{4} F_0 \right) \text{ при } F_0 \geq 0,5, \quad (9)$$

где критерий Фурье имеет вид

$$F_0 = \frac{P_c K \tau}{l^2 \Pi \mu}. \quad (10)$$

Найденное решение позволяет получить выражение для времени запаздывания выравнивания давления

$$\tau_3 = \frac{\pi^2 l^2 \Pi \mu}{4 K P_c} \ln \left[\frac{4 (P_0^2 - P_c^2)}{\pi (P^2 - P_c^2)} \right]. \quad (11)$$

Оценка времени запаздывания. Для оценки τ_3 можно пренебречь объемом пор, сообщающихся со свободным пространством, т. е. пористость примем равной единице.

В работе [7] с учетом решения классических гидродинамических уравнений для медленно установившегося течения показано, что проницаемость системы из капиллярных трубок записывается в виде (в единицах дарси):

$$K = \frac{c \cdot \Pi^3}{\Omega^2} 10^8, \quad (12)$$

где c — постоянная Козени, для прямоугольного сечения $c = 0,56$; Ω — удельная поверхность пористого материала.

$$\Omega = \frac{2\pi dl}{\pi dh l} = \frac{2}{h}. \quad (13)$$

В этом случае коэффициент проницаемости равен $0,14 \cdot 10^8 \text{ д.}$

Коэффициент динамической вязкости газа примем равным $2,5 \cdot 10^{-2}$ спз, что является средним между коэффициентами вязкости для водяного пара, Хе и Кг. Принимая $P_0 = 71$, $P_c = 1$ ат, $l = 100$ см, получаем, что давление на закрытом конце твэла достигнет значения $1,1 P_c$ через 4,6 с.

Если дефект расположен на расстоянии 200 см от конца, то время запаздывания ~ 20 с.

Полученные оценки справедливы для $F_0 \geq 0,5$. Подставляя в выражение (10) принятые значения, убеждаемся, что τ_3 должно быть больше 0,1 с, т. е. сделанное допущение справедливо.

Проведенная оценка времени запаздывания позволяет сделать вывод, что давление под оболочкой негерметичного твэла с небольшой задержкой следует за изменением давления в реакторе в процессе его расхолаживания.

Оценка количества газа под оболочкой. Анализ упрощенной модели газовыделения из негерметичного твэла при снижении давления в реакторе показывает, что к моменту достижения атмосферного давления в корпусе реак-

тора под оболочкой твэла остается лишь часть имевшегося там газа. Количество вышедшего газа можно оценить, используя газовые законы. Для принятых выше значений P_c и P_0 при $T_0 \sim 1200$ К получим, что под оболочкой негерметичного твэла остается 4,3% имевшегося там газа. Таким образом, после остановки реактора при снижении давления от рабочего до атмосферного более 95% газообразных продуктов деления, имевшихся под оболочкой негерметичного твэла, выходят в теплоноситель, практически мгновенно следуя за изменением давления в корпусе реактора.

Поступила в Редакцию 28/X 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поликарпов В. И. и др. Контроль герметичности тепловыделяющих элементов. М., Госатомиздат, 1962.
2. Ластман Б. Радиационные явления в двуокиси урана. М., Атомиздат, 1964.
3. Самсонов Б. В., Фрей А. К. Роль газовых пузырей в выделении газообразных осколков деления UO_2 . «Атомная техника за рубежом», 1970, № 8.
4. Куммерер К. Поведение твэлов при высоком выгорании. «Атомная техника за рубежом», 1972, № 9.
5. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М., Госэнергоиздат, 1963.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.
7. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. М., «Мир», 1964.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОБИНИ