

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С МИКРОТВЭЛАМИ ПРИ ПОТЕРЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Цель работы – определение зависимости температуры ядерного реактора с микротвэльным топливом от времени, прошедшего с момента начала аварии (потеря теплоносителя).

Одним из возможных путей создания безопасного с точки зрения выхода радиоактивных веществ из реактора в окружающую среду является переход на использование микротопливных частиц, собранных в шаровых твэлах на основе пироуглерода, разработанных для российских проектов ВТГР. Проведенные исследования микротвэлов показали высокую коррозионную стойкость их оболочек при работе в паровой среде [1].

В настоящей работе проведена оценка температуры микротопливных частиц при аварии, связанной с потерей теплоносителя в предложенном [2] водяном реакторе с микротвэлами, электрическая мощность реактора 150 МВт. В реакторе используются шаровые твэлы диаметром 60 мм, заплавленные в алюминиевую матрицу. Цилиндрическая тепловыделяющая сборка имеет диаметр 182 мм и высоту 1000 мм, в ней находятся 114 шаровых твэлов. Шаровой твэл имеет топливный сердечник и графитовую оболочку, в свою очередь топливный сердечник состоит из сферических микротвэлов.

Микротвэл выполнен в виде шара с сердечником из двуокиси урана и четырехслойной оболочкой из высокотемпературных керамических материалов. Первых два слоя – промежуточное покрытие из пироуглерода. Этот внутренний слой поглощает продукты деления. Он имеет относительно высокую пористость, что позволяет накапливать в пустотах газообразные продукты деления. Следующий слой образован карбидом кремния, который эффективно удерживает определенные щелочноземельные и редкоземельные продукты деления. Последний, наружный слой образован высокоплотным пироуглеродом, непроницаемым для газообразных продуктов деления [3].

Получить решение задачи для отдельных шаровых твэлов в активной зоне и тем более для микротвэлов не представляется возможным ввиду ее большой размерности. Поэтому расчет температуры в микротвэле проводился следующим образом: находилась зависимость  $T(t)$  для однородного по объему реактора, нагреваемого за счет остаточного тепловыделения, а затем учитывалось повышение температуры в микротвэле при наличии двух тепловых барьеров – оболочки микротвэла и оболочки шарового твэла.

Для определения повышения температуры на каждом тепловом барьере использовался закон Фурье для переноса тепла за счет теплопроводности:

$$\frac{P_1}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = -k \frac{dT}{dr}, \quad (1)$$

где  $P_1$  – тепловая мощность, выделяющаяся в шаровом твэле.

В результате были получены следующие зависимости для определения температуры в шаровом твэле при граничном условии  $T_0 = 593$  °К (температура теплоносителя):

$$T(r) = 546 + \frac{1,70}{r}, \text{ °К при } 3,0 \cdot 10^{-2} \leq r \leq 3,65 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad (2)$$

для температуры в слое алюминия тепловыделяющей сборки

$$T(r) = 431 + \frac{5,15}{r}, \text{ °К при } 2,5 \cdot 10^{-2} \leq r \leq 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad (3)$$

для температуры в защитном слое графита шарового твэла

$$T(r) = 741 - 1,65 \cdot 10^5 \cdot r^2, \text{ °К при } 0 \leq r \leq 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad (4)$$

для температуры в нутрии сердечника шарового твэла.

Аналогично был проведен расчет повышения температуры на тепловом барьере микротвэла. Расчет показал, что повышение температуры на тепловом барьере в шаровом твэле составляет 148 °К, на тепловом барьере микротвэла – 72 °К и общее максимальное превышение температуры в микротвэле над температурой теплоносителя составляет 220 °К.

При расчете роста температуры реактора предполагалось, что все активные системы тепловой защиты остановленного реактора не работают, и выделяющаяся за счет распада осколков деления энергия идет на нагревание массы веществ в реакторе и тепловое излучение с поверхности корпуса реактора.

Уравнение для зависимости  $T(t)$  получим из закона сохранения энергии. Пусть за промежуток времени  $dt$  температура в реакторе повысится на  $dT$ , тогда:

$$N(t) dt = (c_z m_z + c_y m_y + c_a m_a + c_c m_c) dT + \sigma(T^4 - T_c^4) S dt, \quad (5)$$

где  $N(t)$  – мощность остаточного тепловыделения в остановленном реакторе;  $c_i, m_i$  – удельная теплоемкость и масса  $i$ -го материала (графита, урана, алюминия, стали) в реакторе;  $S$  – площадь излучающей поверхности защитного корпуса реактора.

Мощность остаточного тепловыделения может быть аппроксимирована формулой:

$$N(t) = 0,065 N_0 \exp \left[ -0,0749 (\lg t + 1)^2 \right], \quad (6)$$

где  $N_0$  – номинальная тепловая мощность реактора – 500 МВт;  $t$  – время после аварии, с.

На рис. 1 приведена зависимость распределения температуры (по шкале Цельсия) от времени, прошедшего с начала аварии, начальная температура принималась равной 320 °С.

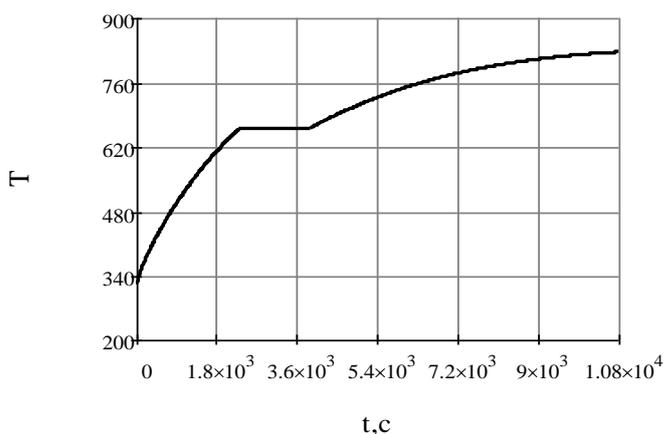


Рис. 1

Для коэффициентов теплового излучения от 0,4 до 1 (абсолютно черное тело) получено, что повышение температуры до точки плавления алюминия тепловыделяющих сборок происходит за промежуток времени около 40 мин. После плавления алюминия, занимающего около 26 мин, шаровые твэлы находятся на дне корпуса реактора.

Таким образом, получено, что в рассматриваемом аварийном реакторе в течение относительно длительного

промежутка времени температура микротвэлов не превысит критического для них значения, и осколки деления будут надежно изолированы от внешней среды тремя барьерами безопасности: оболочки микротвэла и шарового твэла и корпус реактора.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Филиппов Г.А., Черников А.С., Попов С.В. и др. Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 4, с. 270-275.
2. Гольцев А.О., Кухаркин Н.Е., Мосевичкий И.С. и др. Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 6, с. 417-423.
3. Черников А.С., Пермяков Л.Н., Федик И.И. и др. Атомная энергия, 1999, т. 87, вып. 6, с. 451-462.