

## ОЦЕНКА РЕСУРСА ГРАФИТА ТОПЛИВНЫХ БЛОКОВ РЕАКТОРА ГТ-МГР

Бойко В.И., Гаврилов П.М.\*, Кошелев Ф.П., Мещеряков В.Н.\*,  
Нестеров В.Н., Ратман А.В.\*\*, Шаманин И.В.

Томский политехнический университет  
\*ФГУП Сибирский химический комбинат. г. Северск  
\*\*ФГУП Горно-химический комбинат. г. Железногорск  
E-mail: nesterov@phtd.tpu.edu.ru

Изложена методика определения ресурса реакторного графита с учетом особенностей спектра нейтронов и сопутствующего гамма-излучения в активной зоне. Проведена оценка ресурса графита топливных блоков реактора ГТ-МГР, отличающегося высокой энергонапряженностью и компактностью активной зоны. Сформулированы рекомендации относительно определения интервала между перегрузками топлива, выполнение которых обеспечивает гарантированную безопасную эксплуатацию топливных блоков.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из претендентов среди реакторов нового поколения, удовлетворяющих требованиям развивающейся широкомасштабной атомной энергетики, является газотурбинный модульный высокотемпературный гелиевый реактор (ГТ-МГР). Принципиальными особенностями ГТ-МГР являются [1]:

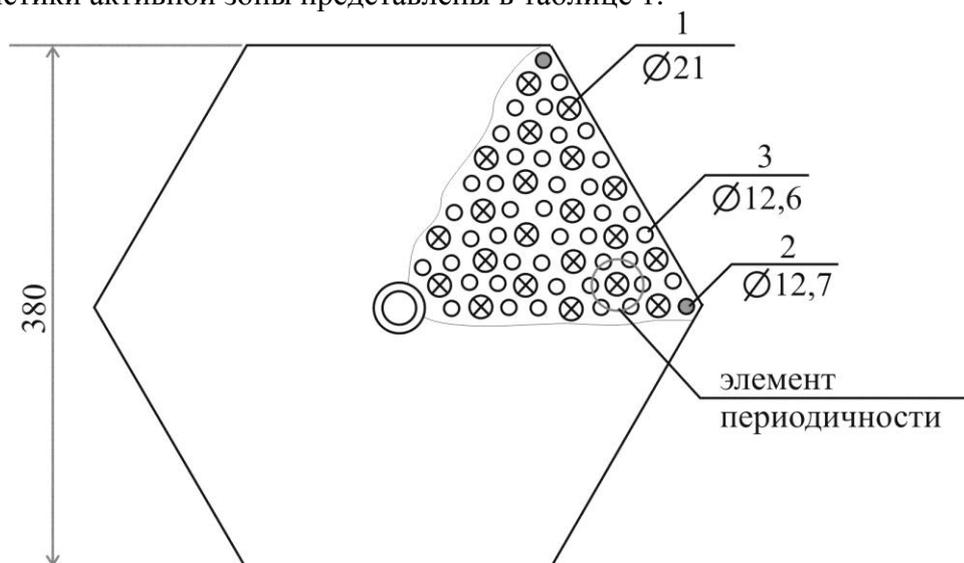
- высокая эффективность производства электроэнергии (КПД около 50 %);
- возможность использования высокопотенциального тепла в новых технологических процессах;
- повышенная безопасность, обусловленная самозащищенностью и невозможностью плавления активной зоны при тяжелых авариях;
- эффективное использование ядерного топлива и возможность реализации различных вариантов топливных циклов: уран-ториевый, плутоний-ториевый;
- снижение теплового и радиационного воздействия на окружающую среду;
- прогнозируемая приемлемость экономических показателей в отношении стоимости электроэнергии по сравнению с альтернативными энергоисточниками.

Значения критического флюенса графита в высокотемпературной области  $800\div 1000$  °С уменьшаются в пределах  $10^{22}\div 2\cdot 10^{21}$  см<sup>-2</sup> [2], соответственно. Компактность активной зоны приводит к росту доли повреждающих нейтронов ( $E_n > 0,18$  МэВ) в общем потоке. Эти обстоятельства обуславливают относительно низкое значение ресурса графита. Таким образом, реалистичная оценка ресурса графита в высокотемпературном реакторе ГТ-МГР с компактной активной зоной является целесообразной.

### АКТИВНАЯ ЗОНА РЕАКТОРА ГТ-МГР

При проектировании ГТ-МГР за основу был принят реактор тепловой мощностью 600 МВт с кольцевой активной зоной, разработанный компанией GENERAL ATOMICS. Активная зона в поперечном сечении представляет собой кольцо шестигранной формы, окруженное центральным (цилиндрическим) и боковым (кольцевым) графитовыми отражателями. Топливный блок (рис. 1) представляет собой шестигранную графитовую призму с топливными элементами, размещенными в отверстиях блока. В блоках имеются отверстия для загрузки выгорающего поглотителя и прохода гелиевого теплоносителя. Активная зона содержит 102 топливные колонны, каждая из которых набрана из 10

топливных блоков. Блоки в колонне фиксируются с помощью штифтов. Основные характеристики активной зоны представлены в таблице 1.



**Рис. 1.** Топливный блок активной зоны реактора ГТ-МГР: 1 – канал для теплоносителя; 2 – канал для выгорающего поглотителя; 3 – топливный канал

**Таблица 1.** Основные характеристики активной зоны реактора ГТ-МГР [3]

Характеристика	Значение
Тепловая мощность активной зоны, МВт	600
Внутренний эквивалентный диаметр, м	2,96
Внешний эквивалентный диаметр, м	4,84
Высота активной зоны, м	7,92
Средняя удельная энергонапряженность, МВт/м <sup>3</sup>	6,6
Количество топливных колонн в активной зоне	102
Количество топливных блоков в колонне	10
Загрузка урана на топливный блок, кг	4,25
Обогащение по U <sup>235</sup> , %	19,9 (14 – среднее по активной зоне)
Загрузка выгорающего поглотителя (естественного бора) на каждый из 6 стержней в топливном блоке, г	1,13÷2,25
Время между перегрузками, эфф. сут.	540
Кампания топлива в активной зоне, эфф. сут.	1080
Максимальное выгорание топлива, МВт·сут./тU	1,4·10 <sup>5</sup>
Максимальный запас реактивности в холодном разотравленном состоянии в процессе кампании, % δk/k	12,5
Температурный эффект реактивности, % δk/k	< 4,9
Максимальная удельная энергонапряженность активной зоны, МВт/м <sup>3</sup>	< 23
Эффективность 48 пар стержней СУЗ на ходе 5 м, % δk/k	> 14
Отравление реактора Xe, % δk/k	< 2,6
Эффективность 18 каналов системы ШСКР, % δk/k	> 8,2
Давление теплоносителя, МПа	7,07
Температура вход/выход активной зоны, °С	490/850

Загрузка урана в расчете на один топливный блок, содержащий 198 топливных элементов диаметром 1,26 см и высотой 79,2 см, составляет 4,25 кг. В каждом топливном элементе содержится 35300 микротвэлов, часть из них содержит обедненный диоксид

урана. Соотношение топливных и воспроизводящих микрочастиц 2,5/1. Обогащение по  $U^{235}$  составляет 19,9 %. Среднее по активной зоне обогащение – 14 %.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ПОТОКОМ СОПУТСТВУЮЩЕГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Анализ современного состояния исследований свойств реакторного графита показывает, что сильное влияние на значение критического флюенса и, следовательно, и ресурс графита, оказывают значения плотности потока сопутствующего  $\gamma$ -излучения и эквивалентной температуры облучения [4]. Эквивалентная температура облучения характеризуется суммарным тепловыделением за счет замедления нейтронов и поглощения  $\gamma$ -квантов.

Тепловыделение, обусловленное замедлением нейтронов, прямо пропорционально плотности потока нейтронов и определяется нейтронно-физическими особенностями реактора. Плотность объемного тепловыделения за счет нейтронов в центральном графитовом блоке определяется соотношением:

$$q_V^H = \left( \frac{E_n}{E_f} \right) \cdot k_V \left( \frac{\xi \Sigma_s}{\bar{\xi} \Sigma_s} \right) \cdot \left( \frac{N}{V_{A3}} \right), \quad (1)$$

где  $E_n$  – энергия, уносимая нейтронами деления в графит;  $E_f$  – энергия деления  $U^{235}$ ;  $\xi \Sigma_s$  – замедляющая способность графита;  $\bar{\xi} \Sigma_s$  – средняя замедляющая способность материала активной зоны;  $N$  – тепловая мощность реактора;  $V_{A3}$  – объем активной зоны;  $k_V$  – коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны.

В активной зоне  $\gamma$ -кванты образуются при делении, при переходе осколков деления из возбужденного состояния в основное и в результате поглощения тепловых нейтронов ядрами среды. Для всех ядер имеются строго определенные энергетические уровни возбуждения и механизмы снятия этого возбуждения, свойственные только данному сорту ядер. Следовательно, спектр  $\gamma$ -излучения зависит от материального состава активной зоны и состава ядерного топлива. Материальный состав и степень гетерогенности активной зоны также оказывают влияние на процесс поглощения энергии  $\gamma$ -излучения и, тем самым, определяют – какая доля энергии  $\gamma$ -квантов преобразуется в тепловую в блоке замедлителя. Следовательно, тепловыделение, обусловленное поглощением  $\gamma$ -квантов, прямо пропорционально плотности потока тепловых нейтронов. Его вклад в суммарное тепловыделение определяется материальным составом и гетерогенностью активной зоны. Таким образом, в соотношение (1) необходимо внести фактор (множитель)  $\Delta$ , характеризующий отношение суммарного тепловыделения за счет нейтронов и  $\gamma$ -квантов к тепловыделению только за счет нейтронов. В результате:

$$q_V^H = \left( \frac{E_n}{E_f} \right) \cdot k_V \left( \frac{\xi \Sigma_s}{\bar{\xi} \Sigma_s} \right) \cdot \left( \frac{N}{V_{A3}} \right) \cdot \Delta.$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ФЛЮЕНСА ПОВРЕЖДАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ

Для определения нейтронно- и теплофизических параметров эксплуатации реакторного графита в топливном блоке выделяется элемент периодичности (рис. 1), который содержит один канал для теплоносителя и два топливных канала (по совокупности фрагментов). Эквивалентный радиус элемента периодичности составляет  $R_{\text{Э}} = 1,98$  см.

Из средней удельной энергонапряженности ( $\bar{q}_V$ ) определяется плотность потока тепловых нейтронов:

$$\Phi_m = \frac{\bar{q}_V}{E_f \cdot \bar{\Sigma}_f},$$

где  $\bar{\Sigma}_f$  – среднее по топливному блоку значение макроскопического сечения деления.

На предварительном этапе расчета предполагается, что распределение плотности потока быстрых нейтронов по АЗ равномерно. Плотность потока быстрых нейтронов ( $\Phi_\delta$ ) разделяется на плотность потока повреждающих нейтронов  $\Phi_n$  ( $E_n > 0,18$  МэВ) и не повреждающих нейтронов ( $340$  эВ  $< E_n < 0,18$  МэВ). Так же разделяются плотности потоков резонансных нейтронов ( $\Phi_p$ ) и тепловых нейтронов ( $\Phi_m$ ). Оценки показывают, что плотности потоков нейтронов для водоохлаждаемых графитовых реакторов соотносятся примерно как:

$$\Phi_\delta / \Phi_n = 2,75; \Phi_\delta / \Phi_p = 2,17; \Phi_p / \Phi_m = 0,4.$$

Для реакторов ГТ-МГР отношения плотностей потоков быстрых и повреждающих нейтронов, быстрых и резонансных нейтронов изменяются незначительно. Однако, спектр становится более жестким. В результате 26-группового расчета получены следующие отношения:

$$\Phi_\delta / \Phi_n = 2,55; \Phi_\delta / \Phi_p = 2,06; \Phi_p / \Phi_m = 3,07.$$

Значение флюенса повреждающих нейтронов за год (270 эфф. сут.) эксплуатации реактора, таким образом, составляет  $1,3 \cdot 10^{21}$  см<sup>-2</sup>.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ФЛЮЕНСА

Для определения значения критического флюенса необходимо провести расчет эквивалентной температуры облучения графита [5]. Для проведения консервативной оценки можно считать, что активная зона гомогенная и вся энергия деления выделяется в графите. Расход теплоносителя в одном канале определяется соотношением:

$$G = \frac{N}{n_{эл} \cdot (T_{вых} - T_{вх}) \cdot C_p},$$

где  $n_{эл}$  – количество элементов периодичности в активной зоне;  $C_p$  – теплоемкость теплоносителя;  $T_{вх}$  и  $T_{вых}$  – температура входа и выхода теплоносителя, соответственно. Все термодинамические характеристики теплоносителя выбирались для температуры 700 °С и давления 7,07 МПа.

Скорость теплоносителя в канале определяется соотношением:

$$v = \frac{G}{\rho \cdot S_{ТН}},$$

где  $\rho$  – плотность теплоносителя;  $S_{ТН}$  – проходное сечение для теплоносителя.

Для расчета значения коэффициента теплоотдачи используется соотношение:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot Nu,$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $d$  – эквивалентный диаметр канала для теплоносителя (в данном случае он равен геометрическому).

В практике теплогидравлических расчетов для цилиндрических и плоских поверхностей в случае турбулентного потока используется следующее соотношение:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43},$$

где  $Re$  и  $Pr$  – критерии Рейнольдса и Прандтля, соответственно. Их значения определяются соотношениями:

$$Re = v \cdot d / \nu,$$

$$\text{Pr} = \nu / a,$$

где  $\nu$  и  $a$  – кинематическая вязкость и коэффициент температуропроводности теплоносителя, соответственно.

Эквивалентная температура облучения графита в элементе периодичности определяется соотношением:

$$T(r) = T_{ТН} + q_S \cdot \left[ \frac{1}{\alpha} + \frac{R_{ТК}}{\lambda_{зам} \cdot (1 - R_{ТК}^2 / R_Э^2)} \left( \ln \frac{r}{R_{ТК}} - \frac{r^2 - R_{ТК}^2}{2 \cdot R_Э^2} \right) \right],$$

где  $R_{ТК}$  – радиус канала для теплоносителя;  $r$  – радиальная координата,  $R_{ТК} \leq r \leq R_Э$ ;  $T_{ТН}$  – температура теплоносителя, в данном случае выбрана 700 °С;  $q_S = \frac{(R_Э^2 - R_{ТК}^2)}{2 \cdot R_{ТК}} \cdot q_V$  – поверхностная плотность энерговыделения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ВЫВОДЫ

Определено, что значение эквивалентной температуры облучения графита на эквивалентном радиусе при средней удельной энергонапряженности 6,6 МВт/м<sup>3</sup> составляет 785 °С. При таком значении графит может эксплуатироваться более 7 лет, следовательно проектная кампания топлива длительностью 1080 эфф. сут. с запасом обеспечена работоспособностью графита. Однако, при максимальном значении удельной энергонапряженности 23 МВт/м<sup>3</sup> эквивалентная температура облучения достигает 1000 °С. При таком значении ресурс графита составляет около 1,5 лет. Следовательно, кампания топлива не обеспечивается работоспособностью графита.

Таким образом, для гарантированной безопасной эксплуатации топливных блоков в активной зоне необходимо:

- уменьшить интервал между перегрузками от 540 эфф. сут., что соответствует 2 годам, до 270÷300 эфф. сут.;
- перегрузки топлива осуществлять с учетом нейтронно- и теплофизических параметров эксплуатации в месте расположения топливного блока в активной зоне до перегрузки;
- перемещение топливных блоков в активной зоне производить как в радиально-азимутальном, так и в аксиальном направлениях. При этом реализуется режим движения топлива “от периферии к центру активной зоны”, который обеспечивает приближение к режиму непрерывной перегрузки (перемещения).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по ядерным энерготехнологиям: Пер. с англ./ Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун; Под ред. В.А. Легасова. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
2. Карпухин В.И., Николаенко В.А., Кузнецов В.Н. Критический флюенс нейтронов как фактор, определяющий ресурс графитовой кладки РБМК // Атомная энергия. – 1997. – № 5. – С. 325 – 330.
3. Основные положения концептуального проекта и компоненты установки ГТ-МГР. “Дженерал Атомикс” – А 21351, июнь, 1993. – 112 с.
4. Виргильев Ю.С. Свойства реакторного графита и его работоспособность в водографитовых реакторах // Материаловедение. – 2001. – № 2. – С. 44 – 52.
5. Бойко В.И., Шидловский В.В., Нестеров В.Н. и др. Определение ресурса реакторного графита с учетом неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны // Известия высших учебных заведений. Сер. Ядерная энергетика, 2004, № 4, С. 26–30.