

Анализ моделей каскадной функции для оценки скорости накопления точечных дефектов в реакторном графите топливных блоков реактора ГТ-МГР

П.А. Комаров, Д.К. Пугачев, А.М. Мочалов
dkp2@tpu.ru

*Научный руководитель: к.т.н., В.Н. Нестеров, доцент кафедры ФЭУ ФТИ
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.
Томск*

Состояние исследований. Высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем – это новый тип универсальных атомных энергоисточников, уникальные свойства которых, позволяют получать высокопотенциальное тепло. Температура теплоносителя на выходе из активной зоны достигает значения 850°C. Это определяет широкие возможности использования данного типа реакторов для производства электроэнергии с высоким КПД в газотурбинном цикле и для снабжения высокотемпературным теплом процессов химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслей промышленности.

Замедлителем в высокотемпературных реакторах служит ядерночистый реакторный графит. Он же является основным конструкционным материалом топливных блоков. Под действием нейтронного излучения в кристаллической структуре графита образуются точечные дефекты (пары Френкеля), которые под действием сопутствующего гамма-излучения и температуры облучения могут либо рекомбинировать, либо диффундировать к местам «стока» образуя тем самым более сложные дефекты. Аналитическая схема процесса дефектообразования в кристаллической решетке графита при реакторном облучении описана в работе [1]. Для ее реализации необходимо определить значения скоростей образования точечных дефектов в графите. Расчет проводится на примере спектра потока нейтронов, полученного для высокотемпературного реактора типа ГТ-МГР. В работе рассмотрим четыре модели каскадной функции ($\nu_{\text{ПВА}}$). Значение каскадной функции дает среднее число атомов, образованных атомом отдачи с энергией ($E_{\text{ПВА}}$).

Модели каскадных функций. В работе представлены четыре модели каскадной функции с общими условиями: $\nu_{\text{ПВА}} = 0$, если $E_{\text{ПВА}} < E_d$; $\nu_{\text{ПВА}} = 1$, если $E_d \leq E_{\text{ПВА}} < 2E_d$, где E_d – средняя энергия смещения атома из кристаллической решетки, это энергия ПВА ниже которой он не способен создавать дефекты, для графита это значение составляет 63 эВ. В тексте модели различаются по именам ученых, которые ввели соответствующие поправки [2]:

1. Модель Кинчина и Пиза:

$$\nu_{\text{ПВА}} = \frac{E_{\text{ПВА}}}{2E_d}, \text{ если } 2E_d \leq E_{\text{ПВА}}.$$

2. Модель Снайдера и Нейфельда:

$$\nu_{\text{ПВА}} = \frac{E_{\text{ПВА}}}{2E_d}, \text{ если } 2E_d \leq E_{\text{ПВА}} \leq 4E_d;$$

$$\nu_{\text{ПВА}} = 0,56(1 + \frac{E_{\text{ПВА}}}{E_d}), \text{ если } 4E_d < E_{\text{ПВА}}.$$

3. Модель Сандерса:

$$\nu_{\text{ПВА}} = 0,52 \frac{E_{\text{ПВА}}}{2E_d}, \text{ если } 2E_d \leq E_{\text{ПВА}}.$$

4. Модель Линдхарда:

$$\nu_{\text{ПВА}} = 987 - 980 \exp(-3,81 \cdot 10^{-6} E_{\text{ПВА}}), \text{ если } 2E_d \leq E_{\text{ПВА}}.$$

Результаты расчетов. На рис 1 представлены каскадные функции для 4-х моделей в 26-групповом спектре потока нейтронов, видно, что максимальное значение каскадной функции достигает 10 000. В модели Линдхарда это значение не превышает 1 000. Экспериментально установлено, что нейтроны с энергией меньше 10 МэВ не могут создавать каскад дефектов более чем из 1 000 шт [2].

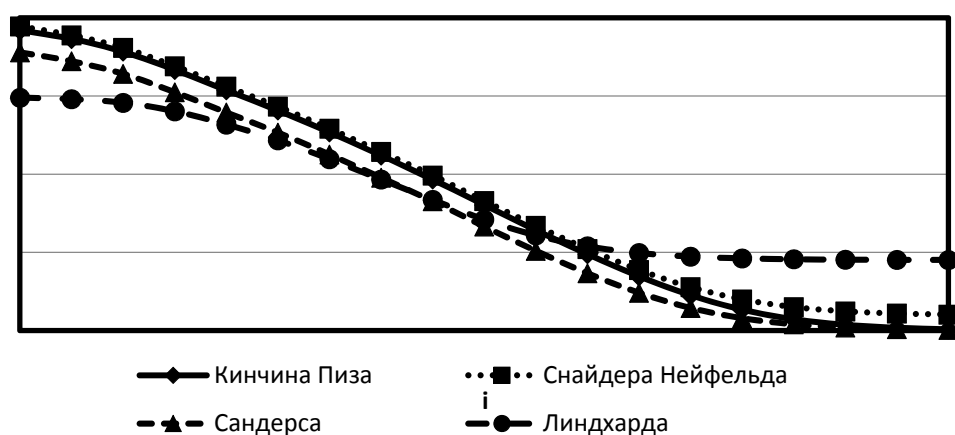


Рис. 1. Каскадная функция для U-Ри ЯТЦ при $C(^{235}\text{U})=20\%$, $C(\text{Pu})=0\%$ (i – номер группы нейтронов, создающих дефекты, в 26-групповом представлении спектра потока нейтронов)

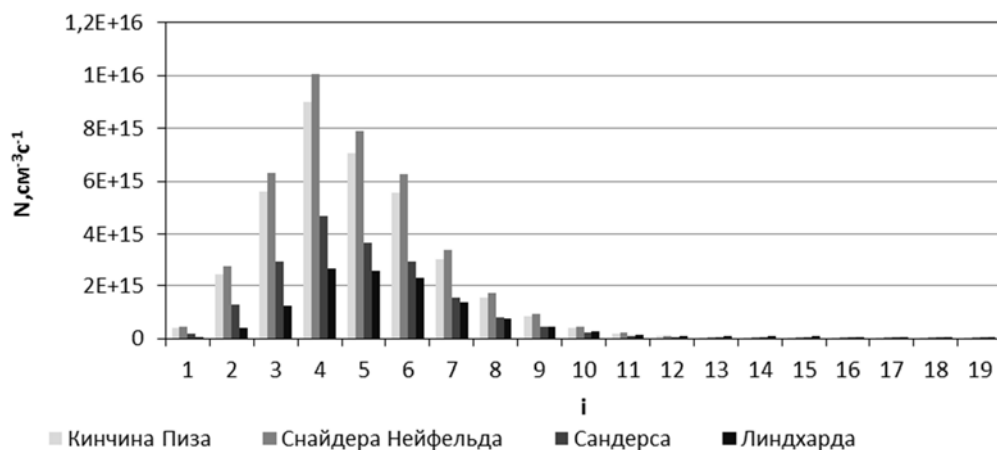


Рис. 2. Скорости образования дефектов для 26-ти групп по четырем расчетным моделям для U-Ри ЯТЦ при стартовой загрузке ядерного топлива $C(^{235}\text{U})=20\%$, $C(\text{Pu})=0\%$ на четвертый год эксплуатации (конец кампании ядерного топлива)

Выводы. Анализ данных показывает, что при определении скорости накопления дефектов в 4-х групповом расчете значение завышается на 27 %, причем данная погрешность справедлива не только для уран-плутониевого ядерного топливного цикла, но и для торий-уранового для различных стартовых загрузок топлива. В моделях Снайдера и Нейфельда, Сандерса расчетная погрешность сохраняет свое значение 27 %. Этот факт объясняется тем, что во всех 3-х моделях каскадная функция описывается линейной зависимостью. В отличие от этих моделей, математическое выражение Линдхарда имеет экспоненциальную зависимость, вследствие чего, погрешность определения 4-х групповым методом составляет 37%, в сторону увеличения расчетных результатов. Скорость образования дефектов, полученная по модели Линдхарда, в течение кампании проектного ядерного топлива увеличивается от $1,1 \cdot 10^{16}$ до $1,7 \cdot 10^{16}$ см⁻³с⁻¹.

Список литературы:

Нестеров В.Н., Шаманин И.В., Емец Е.Г., Цыганов А.А., Котляревский С.Г., Павлюк А.О. Аналитическая схема дефектообразования в кристаллической решетке графита при реакторном облучении //Известия вузов. Ядерная энергетика, 2008, - № 1. - с. 120-128.

1. М. Томпсон. Дефекты и радиационные повреждения в металлах, Издательство «Мир», М: 1971. – 368 с.