

11. Дан С., Ван С., Ли Ф., Чжоу Б. DG planning incorporating demand flexibility to promote renewable integration // IET Gener. Transm. Distrib. – 2018. – Т. 12., № 20.

Сабитова Радмила Радиковна (Казахстан),  
Иркимбеков Руслан Александрович (Казахстан),  
Прозорова Ирина Валентиновна (Казахстан)

Томский политехнический университет, г. Томск;  
Научный руководитель: Беденко Сергей Владимирович,  
канд. физ.-мат. наук., доцент

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ ИВГ.1М НА НИЗКООБОГАЩЕННОМ ТОПЛИВЕ**

### **Введение**

В настоящее время в Казахстане осуществляется конверсия исследовательского реактора ИВГ.1М на низкообогащенное топливо. В связи с изменением топливной композиции появляется необходимость оценки неравномерности полей энерговыделения реактора.

Исследовательский реактор ИВГ.1М (рис. 1) представляет собой реактор на тепловых нейтронах с легководным теплоносителем и замедлителем. В качестве отражателя нейтронов используется бериллий. Активная зона реактора содержит 30 водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК), в которых установлены топливные сборки. Вокруг активной зоны реактора, в боковом отражателе, расположено десять регулирующих барабанов.

Реактор используется для испытаний различных типов тепловыделяющих сборок в эксплуатационных условиях; для исследований возможных аварийных ситуаций и отработки мер по их предотвращению.

### **Материалы и методы**

Исследования распределения энерговыделения в ядерном реакторе могут проводиться экспериментальными и расчетными методами [1]. При расчетном определении используют коды на основе метода Монте-Карло, которые позволяют производить моделирование для сложной геометрии и составу среды. Экспериментальное исследование проводится для получения реальной оценки исследуемых характеристик и проверки расчетного моделирования.

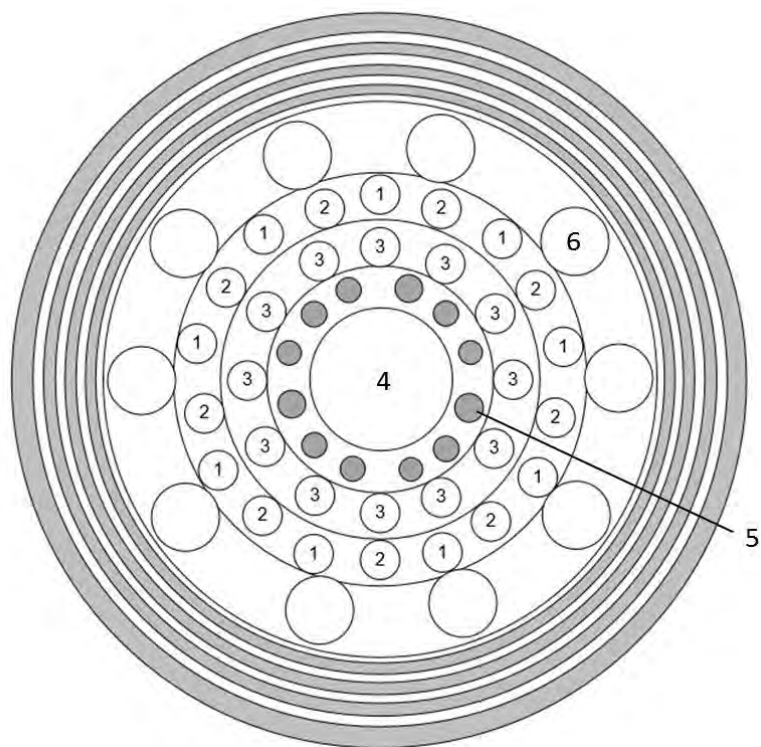


Рис. 1. Активная зона реактора ИВГ.1М

1,2,3 – ряды ВОТК, 4 – петлевой канал;

5 – стержни компенсации реактивности; 6 – регулирующие барабаны

Для реактора ИВГ.1М экспериментальное исследование полей энерговыделения проводят на этапе физического пуска, когда реактор работает на малом и безопасном уровне мощности, без включения принудительного отвода тепла. Исследования производятся с помощью активационного гамма-спектрометрического метода, принцип которого основан на соответствии между энерговыделением и измеряемой активностью продуктов деления или продуктов активации [2-3].

Симметричность активной зоны реактора позволяет определять энерговыделение всей активной зоны по исследованию одного канала из каждого ряда ВОТК. Для этого необходимо заменить три штатных канала каждого ряда на их физические макеты. Физические макеты по материальному составу идентичны штатным, но отличаются возможностью разборки.

В каждый физический макет устанавливается:

1) активационный индикатор – медная проволока, расположенная по длине физического макета. Распределение наведенной активности по длине активационного детектора характеризует распределение плотности потока тепловых нейтронов и, соответственно, распределение энерговыделения по высоте технологического канала;

2) Измерительные твэлы для исследования радиальных энергораспределений. Они представляют собой отрезки твэлов двух зон профилирования, отличающихся содержанием урана.

Измерения проводят после облучательного эксперимента и выдержки физических макетов в реакторе до распада короткоживущих элементов. Для измерений облученного активационного индикатора его предварительно делят на отрезки длиной 2 см.

В качестве регистрирующих приборов используются два идентичных сцинтилляционных гамма-спектрометра, работающих в режиме интегральных дискриминаторов. Второй сцинтилляционный датчик необходим для мониторинга спада активности со временем [4]. Для этого у датчика устанавливают один из исследуемых измерительных твэлов или отрезков проволоки, выбранных в качестве реперных образцов.

Относительное энерговыделение в  $i$ -ом измерительном твэле или отрезке проволоки определяется на основании измерения наведенной активности по формуле:

$$q_i = \frac{I_i}{I_m},$$

где  $I_i$  – интенсивность гамма-излучения (активность)  $i$ -ого исследуемого образца с учетом вычета фонового значения, имп/с;

$I_m$  – интенсивность гамма-излучения (активность) реперного образца с учетом вычета фонового значения, имп/с.

### **Результаты и обсуждение**

Распределение энерговыделения в технологических каналах (топливных сборках) реактора ИВГ.1М представлено на примере результатов расчетного моделирования в программе MCNP6 согласно методике [5].

На рис. 2 представлено относительное высотное распределение энерговыделения в топливных сборках трех рядов ВОТК. Согласно рисунку, энерговыделение (мощность) реактора уменьшается от ряда к ряду в соответствии с законом Бесселя. Более низкие значения энерговыделения в третьем ряду связаны с меньшей длиной канала и меньшим содержанием  $^{235}\text{U}$  в нем.

Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте для 1, 2 и 3 рядов ВОТК составляют 1.49, 1.48 и 1.24, соответственно.

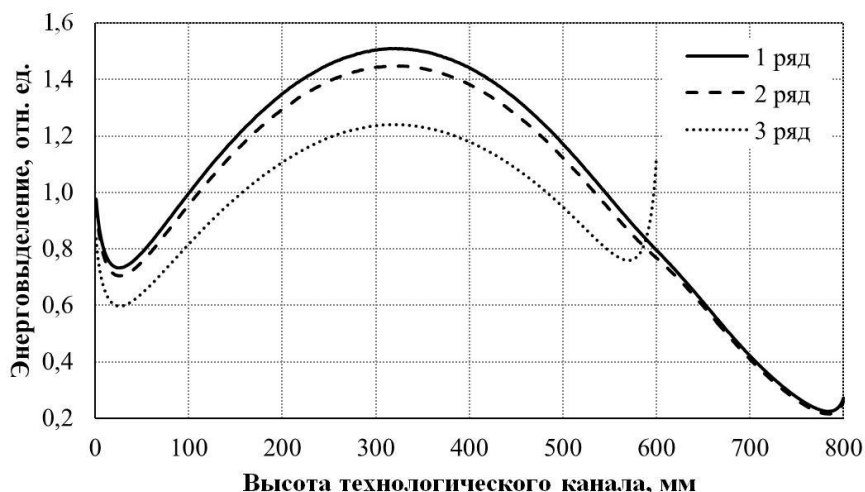


Рис. 2. Относительное высотное распределение энергосодержания в каналах ВОТК

На рис. 3 представлено относительное распределение энергосодержания по радиусу топливной сборки для ВОТК первого ряда. Энергосодержание рассчитано для всех 468 тепловыделяющих элементов, находящихся в топливной сборке.

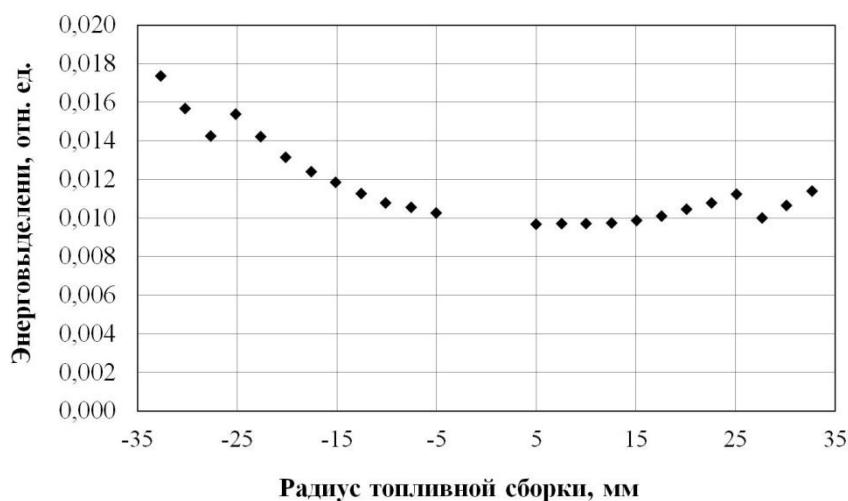


Рис. 3. Относительное распределение энергосодержания по радиусу топливной сборки

Видимые на рис. 3 скачки энергосодержания обусловлены сменой зон профилирования – переход на зону с меньшим содержанием урана. Более высокие значения энергосодержания с левой стороны графика объясняются направленностью топливной сборки к центру активной зоны. Отсутствие энергосодержания в центре связано с расположением в нем стержня из циркония. При этом коэффициент неравномерности по радиусу топливной сборки составляет 1,62.

### Заключение

В докладе рассмотрены методы исследования неравномерности полей энерговыделения, используемые для реактора ИВГ.1М. Приведены результаты MCNP расчета высотного и радиального распределения энерговыделения в технологических каналах реактора ИВГ.1М. Рассчитаны коэффициенты неравномерности полей энерговыделения.

Работа поддержана Министерством образования и Науки Республики Казахстан [грантовый проект № AP09259736].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвин В.И. Определение энерговыделения в активных зонах ИЯР // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции. – 2015. – Т.1 – С. 395-399.
2. Витюк В.А., Вурим А.Д., Витюк Г.А. Практические способы определения энергетических параметров реакторных испытаний в режиме импульсного изменения мощности // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – №2. – С. 80-86.
3. Черепнин Ю. С., Чертков Ю.Б. Методология и результаты исследований физических параметров высокотемпературных реакторов // 20 лет энергетического пуска реактора ИВГ-1. Материалы научно-практической конференции. – 1995. – С. 37-42.
4. Svadlenkova M. et. al., Gamma spectrometry of short living fission products in fuel pins // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2014. – Vol. 739. –P. 55-62.
5. Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. Особенности расчета мощности элементов экспериментального устройства для реакторных испытаний на ИГР // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – №2. – С. 55-60.