

# ИЗМЕРЕНИЕ И МОНИТОРИРОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ИМПУЛЬСНОГО ГОМОГЕННОГО РЕАКТОРА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

*М. А. Демиденко*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В отделении экспериментальной физики РФЯЦ ВНИИЭФ эксплуатируются три исследовательских ядерных реактора (ИЯР): ядерный гомогенный урановый аperiodический реактор ЯГУАР, быстрый аperiodический самогасящийся реактор БАРС-5, импульсный гомогенный реактор испытательного комплекса ИГРИК-2. Реактор ИГРИК-2 должен заменить реактор ИГРИК [1]. В настоящее время он находится на стадии физического пуска, для осуществления которого было необходимо провести измерения и расчеты основных характеристик работы реактора. Одним из основных параметров, характеризующих работу ИЯР, является число делений (или энерговыделение) в активной зоне (АЗ) реактора. Целью данной работы является определение энерговыделения и коэффициентов связи между его значением и показаниями нейтронно-активационных детекторов-мониторов.

В зависимости от конструкции АЗ реактора измерение энерговыделения производится разными методами. Так, для реакторов из металлического высокообогащенного урана типа БАРС, метод определения полного числа делений основан на измерении распределения чисел делений по всему доступному объему АЗ и последующему интегрированию.

Для ИЯР с АЗ растворного типа, таких как ИГРИК и ЯГУАР, метод основан на измерении чисел делений в пробах топливного раствора АЗ, взятых после первого пуска реактора, с последующим пересчетом числа делений на весь объем топливного раствора.

Для определения энерговыделения в АЗ ИЯР при последующей их эксплуатации используют нейтронно-активационные детекторы-мониторы (ДНА), установленные в различные места (опорные точки) на АЗ или около нее. Активность ДНА определяют одновременно с энерговыделением в АЗ, по результатам данных обоих измерений рассчитывают коэффициенты связи между ними [2].

Одновременно с экспериментом проводят расчет Монте-Карло полного числа делений в АЗ и определение активации ДНА. В результате чего сопоставляются экспериментально и теоретически полученные данные.

В данной работе энерговыделение измеряли по второму методу. В результате проведенного эксперимента были рассчитаны коэффициенты связи между энерговыделением и показаниями ДНА, которые устанавливали в опорных точках нейтронного поля реактора. Рассчитанные коэффициенты будут использоваться для обработки данных при последующих пусках реактора, что составляет значимую практическую ценность данной работы.

## Описание реактора

ИГРИК-2 – растворный реактор самогасящегося действия, который может работать в импульсном и статическом режимах (рис. 1). В настоящее время на реакторе ИГРИК-2 достигнута максимальная стационарная мощность 40 кВт. Реактор предназначен генерировать импульсы делений длительностью не менее 2,2 мс с полным энерговыделением до 130 МДж. Реактор предполагается использовать в качестве мощного лабораторного источника нейтронного и гамма-излучения для физических исследований и испытаний различного рода материалов, образцов специального назначения и радиоэлектронной аппаратуры.

Реактор ИГРИК-2 был спроектирован для замены реактора ИГРИК, эксплуатировавшегося в течение 30 лет. Корпус реактора ИГРИК-2 представляет собой полую емкость цилиндрической формы со сложной внутренней конфигурацией (рис. 2). Трехслойные стенки корпуса АЗ рассчитаны на высокое давление. Снаружи корпус закрыт биологической защитой из свинца толщиной 67 мм и защитным кожухом из стали толщиной 5 мм. В защите имеются два окна для выхода излучения. По сравнению с предшественником, ИГРИК-2 имеет сквозную внутреннюю полость с увеличенным диаметром: 390 мм против 310 мм. Для реализации большего энерговыделения увеличен объем топливного раствора до 140 л по сравнению с 50 л ИГРИК. Топливом реактора является раствор уранилсульфата ( $UO_2SO_4$ ) в обычной легкой воде, с добавкой гомогенно введенного поглотителя – соли  $CdSO_4$ . Этот раствор ранее был использован на реакторах ИГРИК и ЭЛИР [1].



Рис.1. Общий вид корпуса АЗ реактора ИГРИК-2

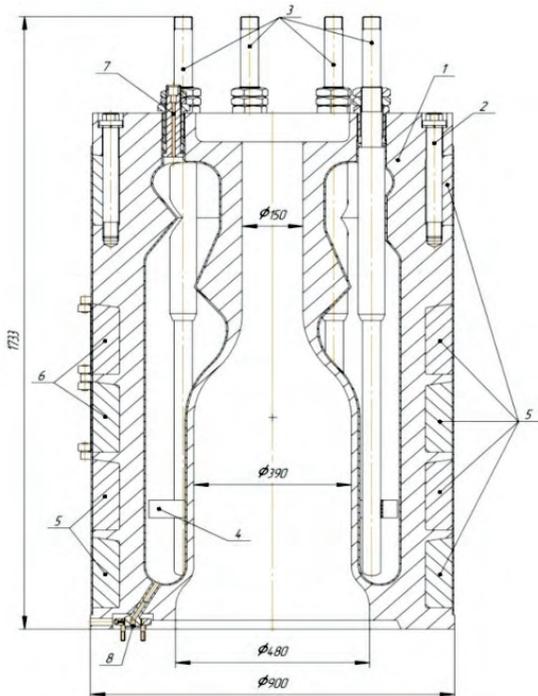


Рис. 2. Разрез корпуса АЗ реактора ИГРИК-2

### Метод измерений

Метод определения энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2 основан на измерении чисел делений в пробах топливного раствора АЗ, полученных после зачетного пуска реактора, с последующим пересчетом на весь объем топливного раствора [2]. Реализация метода происходила по следующим этапам:

- для определения фонового содержания осколков делений (далее радиоактивных продуктов делений (РПД)) в растворе АЗ взяты пробы топливного раствора перед пуском реактора;
- произведен пуск реактора в статическом режиме, энерговыделение зарегистрировано ДНА из никеля;
- через несколько суток после пуска реактора, когда радиоактивность топливного раствора спала до безопасного значения, взяты пробы активированного раствора;
- в химической лаборатории из взятых проб раствора изготовлены фоновые и зачетные счетные образцы;
- проведен гамма-спектрометрический анализ счетных и фоновых образцов, определена активность наиболее информативных РПД;
- на основании полученных данных рассчитано полное число делений в АЗ, реализованное при пуске реактора;
- на основе измеренной активности ДНА и полученного значения энерговыделения в АЗ реактора определены коэффициенты связи.

### Измерения активности РПД

Счетные образцы фоновой и зачетной проб были получены через 23 дня после пуска реактора. Измерения их активности проведено на полупроводниковом детекторе (ППД) из особо чистого германия. ПДД входит в состав гамма-спектрометрического комплекса. Для достижения наибольшей точности определения активности счетных образцов проведены их многократные измерения с разной геометрией между образцом и ППД. На основе этих измерений выбраны наиболее информативные РПД для дальнейшего расчета числа делений.

Наиболее точные данные были получены только по шести РПД (см. табл. 1). Время, прошедшее после пуска реактора, и высокая активность цезия-137 (вклад в суммарную активность более 95 %) не позволили использовать короткоживущие радионуклиды и радионуклиды с энергиями фотонов меньше 662 кэВ. У радионуклидов йода ( $^{131}\text{I}$  и  $^{132}\text{I}$ ) активность была достаточно высока для измерения их содержания в счетных образцах, но полученное число делений по ним было ниже, чем у других РПД примерно в полтора раза. Обосновать это можно тем, что при изготовлении счетных образцов (выпаривание раствора) произошла частичная утечка радионуклидов. Перечень РПД в зачетных пробах, принятых для расчета энерговыделения приведен в табл. 1.

Радионуклиды в топливном растворе ИГРИК-2

Зачетная проба					Фоновая проба				
РПД	T <sub>1/2</sub> , сут	E <sub>γ</sub> , кэВ	A*, Бк/л	Δ, %	РПД	T <sub>1/2</sub> , сут	E <sub>γ</sub> , кэВ	A*, Бк/л	Δ, %
<sup>95</sup> Zr	64,02	756,7; 724,2	6,61 · 10 <sup>8</sup>	4,3	<sup>137</sup> Cs	10990	661,6	3,52 · 10 <sup>8</sup>	4,0
<sup>95</sup> Nb	34,97	765,8	1,16 · 10 <sup>9</sup>	4,3	<sup>144</sup> Ce	284,6	293,3	2,76 · 10 <sup>5</sup>	4,0
<sup>103</sup> Ru	39,27	497,1	5,26 · 10 <sup>8</sup>	4,5	<sup>95</sup> Zr	64,0	756,7; 24,2	1,6 · 10 <sup>5</sup>	6,0
<sup>132</sup> Te	3,26	228,2	1,31 · 10 <sup>10</sup>	5,7	<sup>95</sup> Nb	34,97	765,8	2,5 · 10 <sup>5</sup>	4,3
<sup>140</sup> Ba	12,75	537,3	3,19 · 10 <sup>9</sup>	4,4	<sup>60</sup> Co	1925,2	1332,5	3,04 · 10 <sup>5</sup>	4,0
<sup>140</sup> La	1,678	1597; 815,8; 487; 328,8	2,39 · 10 <sup>10</sup>	4,6					

\*) – активность на 08.08.2017

Перейдем к анализу активности фоновых образцов. Т.к. в реакторе ИГРИК-2 использован топливный раствор реакторов ИГРИК и ЭЛИР, то были идентифицированы долгоживущие радионуклиды <sup>137</sup>Cs и <sup>144</sup>Ce, накопленные за время эксплуатации раствора. Зарегистрированные РПД <sup>95</sup>Zr и <sup>95</sup>Nb были образованы ранее при калибровочных пусках на малой мощности реактора ИГРИК-2. Радионуклид <sup>60</sup>Co образовался в результате активации примесей в дегазирующем растворе при эксплуатации реактора ИГРИК.

Результаты расчета для зачетной и фоновой пробы представлены в табл. 1. Оценки погрешностей измерений сделаны согласно рекомендациям [3].

### Результаты измерения энерговыделения

При расчете энерговыделения учли, что объем делящегося топливного раствора, находившийся в АЗ в зачетном пуске, был равен 111 л из 136 л общего объема раствора в баллоне хранения. После завершения пуска реактора активированный раствор был слит в баллон хранения и перемешан с не активированной частью раствора. Поэтому в расчеты энерговыделения введен поправочный коэффициент на разбавление топливного раствора равный 1,23. Также был учтен вклад долгоживущих фоновых РПД: <sup>95</sup>Zr и <sup>95</sup>Nb. Оценочное значение суммарного энерговыделения в калибровочных пусках реактора равно  $9,4 \cdot 10^{15}$  делений (0,28 МДж).

Расчет энерговыделения в зачетном пуске реактора ИГРИК-2 выполнен на основе измеренной удельной активности шести РПД.

Полное число делений в АЗ реактора при измерении удельной активности отдельного РПД [2]:

$$Wi = \frac{A_i}{\lambda i K_{\text{РПД}}^i} V, \quad (1)$$

где  $K_{\text{РПД}}^i$  – кумулятивный выход i-го РПД. Погрешности кумулятивных выходов РПД взяты из работы [4] и составляют 2...4 % (1σ). Границы погрешности оценки энерговыделения определяются по рекомендациям [3].

Результаты определения энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2 представлены в табл. 2. Число делений в АЗ реактора определено, как средневзвешенное значение показаний шести РПД. Энерговыделение приведено в единицах МДж. Соотношение между числом делений и этими единицами принято  $10^{17}$  делений =  $2,9 \pm 0,16$  МДж.

Таблица 2

Результаты определения энерговыделения в зачетном пуске реактора

№	Радионуклид	Wi, делений	ΔW, % (P <sub>д</sub> = 0,95)
1	<sup>95</sup> Zr	$7,47 \cdot 10^{16}$	10,1
2	<sup>95</sup> Nb	$7,16 \cdot 10^{16}$	10,1
3	<sup>103</sup> Ru	$7,06 \cdot 10^{16}$	10,2
4	<sup>132</sup> Te	$7,26 \cdot 10^{16}$	10,9
5	<sup>140</sup> Ba	$7,78 \cdot 10^{16}$	10,2
6	<sup>140</sup> La	$7,66 \cdot 10^{16}$	10,2

$W = (7,57 \pm 0,78) \cdot 10^{16}$  делений  $2,20 \pm 0,23$  МДж, P<sub>д</sub> = 0,95

### Калибровка детекторов-мониторов энерговыделения

На основе полученных данных определены коэффициенты связи между показаниями нейтронно-активационных детекторов-мониторов и энерговыделением. ДНА из никеля были установлены в следующих опорных точках: штатной позиции мониторинга энерговыделения (М1) и в дополнительных точках поля излучения (М2 и М3):

М1 – 78,6 см от поверхности корпуса реактора на перилах его ограждения;

М2 – центр нижней половины бокового окна (расстояние от основания корпуса – 65 см);

М3 – центр канала АЗ в максимуме распределения флюенса нейтронов (расстояние от основания корпуса – 65 см).

Активность детекторов-мониторов измерена на эталонной гамма-спектрометрической установке ИКЭ-П-2. Статистическая погрешность измерений менее 1 %, полная погрешность 4 % при доверительной вероятности 0,95.

Коэффициенты связи между энерговыделением в АЗ реактора ИГРИК-2 и показаниями ДНА

Коэффициенты связи	$K_{M1}$	$K_{M2}$	$K_{M3}$	$\delta K_w, \%$ ( $P = 0,95$ )
$K_w$ , МДж/(реакций/ядро)	$3,94 \cdot 10^{14}$	$1,70 \cdot 10^{13}$	$2,65 \cdot 10^{12}$	10,7
$K_w$ , делений/(реакций/ядро)	$1,36 \cdot 10^{31}$	$5,87 \cdot 10^{29}$	$9,15 \cdot 10^{28}$	12,2

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные значения чисел реакций

Реакция. Точка измерения (расчета)	Эксперимент	Расчет	Эксперимент /Расчет
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ – место установки детекторов-мониторов ( $R = 125$ см),	$(7,39 \pm 0,41) \cdot 10^{-32}$ $\sigma = 5,5 \%$	$(7,21 \pm 0,19) \cdot 10^{-32}$ $\sigma = 2,6 \%$	1,025
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ – центр канала АЗ	$(1,11 \pm 0,02) \cdot 10^{-29}$ $\sigma = 2,0 \%$	$(1,15 \pm 0,01) \cdot 10^{-29}$ $\sigma = 1,0 \%$	0,965
$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ – центр канала АЗ	$(1,35 \pm 0,03) \cdot 10^{-28}$ $\sigma = 2,5 \%$	$(1,39 \pm 0,02) \cdot 10^{-28}$ $\sigma = 1,6 \%$	0,971

Показания детекторов-мониторов  $Q_{Ni}$  связаны с энерговыделением  $W$  через коэффициент связи  $K_w$  [2]:

$$W = K_w Q_{Ni}. \quad (2)$$

Коэффициент связи для М1 (см. табл. 3) основного штатного места размещения детектора-монитора практически не зависит от уровня раствора в пределах 100...136 л. Значения коэффициентов для дополнительных мест установки М2 и М3 верны только для объема делящегося раствора, равного  $111 \pm 3$  л (изменяется положение максимума распределения числа делений в АЗ).

Одновременно с экспериментальным определением энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2 были выполнены численные расчеты Монте-Карло ряда нейтронно-физических характеристик поля излучения данного реактора. В них входило распределение числа реакций ДНА из никеля и меди в канале и у поверхности корпуса АЗ, а также число реакций детекторов-мониторов энерговыделения. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных приведены в табл. 4. Числа реакций отнормированы на одно деление в АЗ. Оценка границ совпадения этих данных – менее 3 %.

### Заключение

В результате проведенного эксперимента определено значение энерговыделения в активной зоне реактора ИГРИК-2 равное  $(7,57 \pm 0,78) \cdot 10^{16}$  делений

или  $2,20 \pm 0,23$  МДж. Вместе с ним определены коэффициенты связи между показаниями детекторов-мониторов из никеля и энерговыделением. В ходе работы были учтены и обоснованы особенности активации раствора АЗ. На основе выбранной технологии определения энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2, разработана, аттестована и выпущена методика измерения и мониторинга энерговыделения в АЗ реактора ИГРИК-2 нейтронно-активационным методом. На ее основании можно определять значения энерговыделения от  $1 \cdot 10^{16}$  до  $5 \cdot 10^{18}$  делений (от 0,3 Дж до 150 МДж) с погрешностью  $\pm 11 \%$  при доверительной вероятности 0,95.

### Литература

1. Лавренко Б. Н., Сукневич В. В., Порубов С. Г. Вывод из эксплуатации реакторов «ЭБР-Л», «ИГРИК», «ЯГУАР» // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». 2015. Т. II. С. 71.
2. Литвин В. И. Определение энерговыделения в активных зонах ИЯР // Труды межотраслевой научной конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования». 2015. Т. I. С. 395.
3. ГОСТ Р 8.736 – 2011 Государственная система обеспечения единства измерений Измерения прямые многократные. М: Стандартинформ, 2013.
4. Meek M. E., Rieder B. F. Compilation of Fission product yields / Vallections Nuclear Center. NEDO-12154, 1974.