

УДК 621.039.5

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.14>

Оригинальная статья / Original paper

Программа восстановления относительного поля энерговыделения в топливной сборке реактора ИВГ.1М. Верификация и применение

Р.Р. Сабитова¹, Ю.А. Попов¹, Р.А. Иркимбеков¹, С.В. Беденко², И.В. Прозорова^{1,2},
С.Н. Светачев¹, Б.С. Медетбеков¹

¹ Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, 071100 Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит атом, 10

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

Реферат. В рамках работ по переходу исследовательского реактора ИВГ.1М на низкообогащенное урановое (НОУ) топливо на этапе физического пуска проведены исследования, направленные на изучение неравномерности радиального распределения энерговыделения в топливной сборке (ТВС). Методика исследований включала в себя реакторное облучение физических макетов ТВС с НОУ-топливом и последующие гамма-спектрометрические измерения облученных твэлов. При многократных измерениях активности каждого твэла объем исследований возрастает до тысяч измерений, что увеличивает продолжительность исследований и создает дополнительную дозовую нагрузку на персонал. Для сокращения количества измерений предлагается использовать разработанную программу ENREDI (ENergyREleaseDIstribution), основанную на полиномиальной аппроксимации-интерполяции. ENREDI позволяет восстанавливать радиальное поле энерговыделения и коэффициент неравномерности в ТВС из 468-ми твэлов на основе экспериментальной постобработки 10% твэлов от их общего количества. Представлены описание и верификация программы ENREDI с использованием нейтронно-физического моделирования, приведены результаты физических исследований. Результаты верификации показали, что вычислительный алгоритм программы ENREDI обеспечивает достоверное восстановление поля энерговыделения по сечению ТВС с максимальной погрешностью, не превышающей 5%.

Ключевые слова: НОУ-топливо, энерговыделение, интерполяция, восстановление поля энерговыделения, реактор ИВГ.1М.

Для цитирования: Сабитова Р.Р., Попов Ю.А., Иркимбеков Р.А., Беденко С.В., Прозорова И.В., Светачев С.Н., Медетбеков Б.С. Программа восстановления относительного поля энерговыделения в топливной сборке реактора ИВГ.1М. Верификация и применение. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2025;2:167–179.

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.14>

Введение

В 2022 г. в рамках программы физического пуска исследовательского реактора ИВГ.1М после снижения уранового обогащения с 90 на 19,75% по ^{235}U были проведены экспериментальные исследования неравномерности радиальных полей энерговыделения в ТВС 1-го, 2-го и 3-го рядов водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК) с целью установления и контроля тепловых нагрузок реактора с низкообогащенным урановым (НОУ) топливом [1–4]. Эксперименты проводились на физических макетах ТВС с помощью метода активации топливных детекторов (отрезков твэлов-НОУ реактора ИВГ.1М). В физическом макете топливные детекторы устанавливались в измерительную секцию, которая при облучении физического макета находилась на уровне высоты центра активной зоны. Для исследований использовалось 40 из 468-ми твэлов измерительной секции. Ограничение количества топливных детекторов связано с сокращением объема исследований для минимизации дозовых нагрузок на задействованный в исследованиях персонал. Однако такое количество исследуемых точек достаточно, чтобы восстановить значения энерговыделения во всех твэлах секции с помощью численных методов [5].

Среди численных методов восстановления, широко применяемых в различных научных и прикладных областях, можно отметить билинейную и бикубическую интерполяции, сплайны, метод Кригинга и другие. В системах внутриреакторного контроля реактора РБМК восстановление радиально-азимутального энерговыделения проводится с помощью аппроксимации и последующей статистической интерполяции [6]. Для реактора ВВЭР потвэльное восстановление энерговыделения основано на расчете с помощью программ САПФИР_95 и КОРСАР/ГП нейтронных потоков и относительных скоростей деления в твэлах. Значение макропотока нейтронов в месте расположения твэла вычисляется линейной интерполяцией по 24-м рассчитанным точкам ячейки ТВС [7].

Для восстановления относительного поля энерговыделения во всех ТВС реактора ИВГ.1М предложен метод полиномиальной аппроксимации-интерполяции данных, реализованный в разработанной программе ENREDI. Программа предназначена для нахождения радиального коэффициента неравномерности в ТВС и полезна при расчете интегрального энерговыделения в сборках каждого ряда ВОТК [8]. Данная работа посвящена описанию и верификации программы, а также результатам восстановления радиального профиля энерговыделения в ТВС с НОУ-топливом.

ТВС реактора ИВГ.1М и измерительная секция

ТВС реактора ИВГ.1М длиной 600 или 800 мм состоит из циркониевой цилиндрической обоймы, торцевых проницаемых решеток и пакета твэлов в количестве 468-ми штук, уложенных по треугольной решетке. Твэлы представляют собой спиральные стержни с описанным диаметром 2,8 мм и шагом закрутки 30 мм (рис. 1). Топливная композиция твэла состоит из циркониевой матрицы и нитей металлического урана с обогащением 19,75% по ^{235}U , оболочка твэла – цирконий.

Измерительная секция физического макета имеет высоту 10 см и повторяет центральную часть ТВС. Так же, как и ТВС, измерительная секция имеет радиальное



Рис. 1. Внешний вид твэла

профилирование по ^{235}U и разделена на центральную и периферийную зоны профилирования. Внешний вид измерительной секции и схема размещения топливных детекторов в секции приведены на рис. 2. Среднее содержание ^{235}U во фрагментах твэлов измерительной секции ТВС 1-го, 2-го и 3-го рядов ВОТК представлено в табл.1.

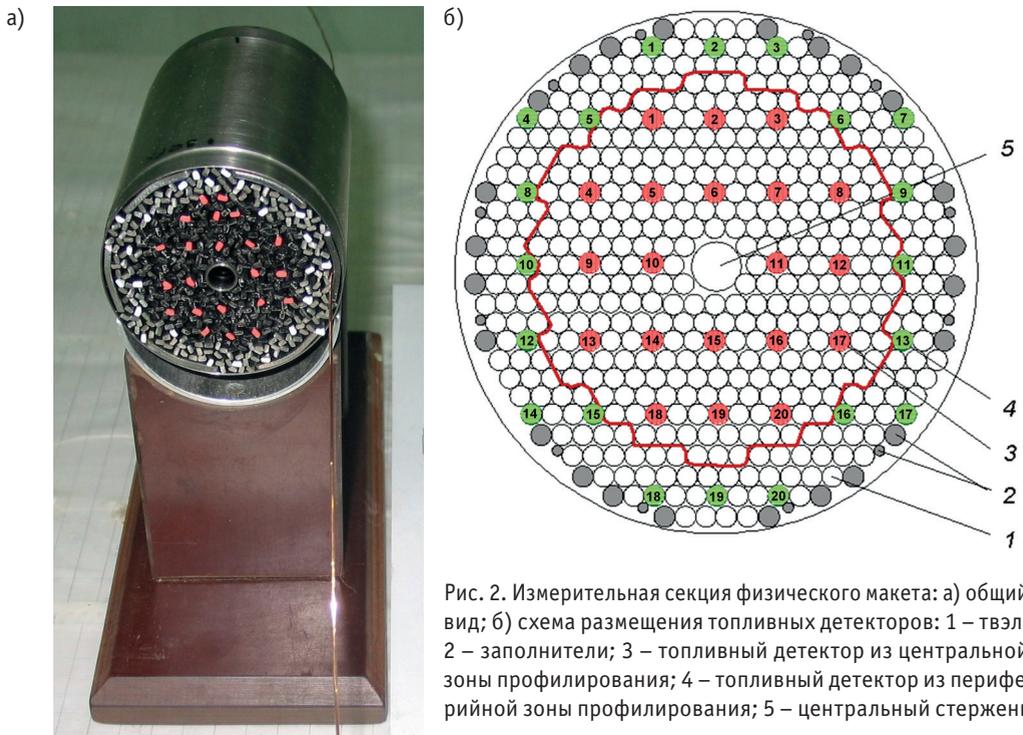


Рис. 2. Измерительная секция физического макета: а) общий вид; б) схема размещения топливных детекторов: 1 – твэл; 2 – заполнители; 3 – топливный детектор из центральной зоны профилирования; 4 – топливный детектор из периферийной зоны профилирования; 5 – центральный стержень

Таблица 1

Содержание ^{235}U во фрагментах твэлов

Параметр	1-ый ряд ВОТК		2-ой ряд ВОТК		3-ий ряд ВОТК	
	Центр	Периферия	Центр	Периферия	Центр	Периферия
Количество твэлов в зоне профилирования	276	192	276	192	276	192
Масса ^{235}U во фрагменте твэла(10 см), г	0,06101	0,05005	0,06080	0,04974	0,06957	0,06078

Алгоритм работы программы ENREDI

Для восстановления распределения энерговыделения по сечению измерительной секции разработана программа ENREDI, основанная на методе многоинтервальной квадратичной интерполяции с равномерным расположением узловых точек по правильной четырехугольной решетке. Шаг решетки составляет $H=6$ по оси X и $L=4$ по оси Y (рис. 3). В результате формируется таблично заданная функция двух переменных с 81-ой узловой точкой.

	1	7	13	19	25	31	37	43	49 X
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2									
3									
4				7.51 7.43 7.38 7.41					
5	X	X	X	6.99 <u>7.00</u> 6.95 6.89 <u>6.82</u> 6.84 6.89 <u>6.99</u> 7.11	X	X	X	X	
6				6.67 6.58 6.52 6.47 6.41 6.36 6.35 6.39 6.46 6.58 6.72 6.90					
7				6.56 6.39 6.27 6.16 6.08 6.01 7.76 7.73 7.76 6.03 6.12 6.24 6.40 6.60 6.77					
8				6.33 6.17 6.02 5.90 7.52 7.41 7.35 7.31 7.32 7.38 7.47 7.61 5.98 6.15 6.32 6.49					
9	X	<u>6.29</u> 6.13 5.97 <u>5.81</u> 7.39 7.24 <u>7.12</u> 7.04 7.00 <u>7.00</u> 7.03 7.10 <u>7.21</u> 7.35 7.52 <u>5.94</u> 6.10 6.27 <u>6.46</u>	X						
10		6.14 5.96 5.80 5.64 7.15 6.98 6.84 6.73 6.68 6.66 6.68 6.73 6.82 6.93 7.08 7.25 5.73 5.90 6.09 6.28							
11		6.04 5.84 5.66 7.14 6.95 6.78 6.63 6.50 6.43 6.39 6.40 6.43 6.49 6.59 6.71 6.86 7.04 7.24 5.75 5.95 6.16							
12		6.01 5.77 5.56 6.99 6.79 6.61 6.46 6.33 6.24 6.19 6.18 6.20 6.24 6.31 6.40 6.53 6.69 6.88 7.09 5.65 5.87 6.12							
13	X	5.76 <u>5.52</u> 6.90 6.67 <u>6.49</u> 6.33 6.21 <u>6.13</u> 6.07 6.03 <u>6.03</u> 6.05 6.10 <u>6.17</u> 6.27 6.40 <u>6.57</u> 6.77 7.01 <u>5.60</u> 5.85	X						
14		5.82 5.53 5.28 6.60 6.40 6.24 6.10 6.00 5.94 5.90 5.88 5.89 5.92 5.97 6.05 6.17 6.31 6.49 6.71 5.36 5.60 5.89							
15		5.93 5.60 5.31 6.60 6.36 6.19 6.03 5.92 5.85 5.80 5.77 5.77 5.79 5.83 5.89 5.99 6.11 6.26 6.47 6.71 5.38 5.66 5.99							
16		5.72 5.40 6.66 6.38 6.17 6.02 5.88 5.80 5.74 5.70 0.00 0.00 5.73 5.78 5.86 5.97 6.10 6.28 6.50 6.77 5.46 5.78							
17	X	5.92 5.54 <u>5.23</u> 6.47 6.22 <u>6.05</u> 5.89 5.79 <u>5.73</u> 5.68 0.00 <u>0.00</u> 0.00 5.72 <u>5.78</u> 5.87 5.99 <u>6.14</u> 6.35 6.60 <u>5.30</u> 5.60 5.97	X						
18		5.70 5.35 6.57 6.28 6.07 5.91 5.78 5.69 5.64 5.61 0.00 0.00 5.64 5.69 5.77 5.88 6.01 6.19 6.42 6.70 5.42 5.76							
19		5.89 5.50 5.18 6.39 6.13 5.96 5.80 5.69 5.64 5.58 5.56 5.57 5.59 5.63 5.70 5.79 5.92 6.07 6.28 6.54 5.27 5.59 5.96							
20		5.68 5.33 5.03 6.25 6.03 5.87 5.73 5.64 5.59 5.55 5.55 5.56 5.59 5.65 5.73 5.84 5.98 6.17 6.41 5.15 5.43 5.79							
21	X	5.51 <u>5.19</u> 6.40 6.15 <u>5.97</u> 5.80 5.69 <u>5.62</u> 5.57 5.54 <u>5.55</u> 5.57 5.62 <u>5.69</u> 5.79 5.92 <u>6.09</u> 6.31 6.58 <u>5.31</u> 5.64	X						
22		5.71 5.37 5.09 6.32 6.10 5.93 5.79 5.69 5.63 5.58 5.57 5.59 5.62 5.68 5.76 5.88 6.04 6.24 6.49 5.22 5.51 5.87							
23		5.58 5.28 5.03 6.29 6.10 5.93 5.81 5.73 5.66 5.63 5.63 5.65 5.69 5.76 5.87 6.01 6.19 6.42 5.16 5.41 5.74							
24		5.49 5.23 5.02 4.85 6.12 5.97 5.86 5.78 5.73 5.70 5.70 5.73 5.79 5.88 6.01 6.17 4.91 5.11 5.35 5.64							
25	X	<u>5.45</u> 5.23 5.04 <u>4.89</u> 6.18 6.04 <u>5.94</u> 5.86 5.81 <u>5.79</u> 5.80 5.84 <u>5.91</u> 6.03 6.18 <u>4.90</u> 5.09 5.31 <u>5.58</u>	X						
26		5.24 5.07 4.93 4.82 6.15 6.06 6.00 5.96 5.94 5.97 6.02 6.11 4.78 4.89 5.05 5.25							
27		5.28 5.12 5.00 4.91 4.85 4.79 6.17 6.13 6.14 4.75 4.80 4.86 4.93 5.02 5.20							
28		5.20 5.11 5.05 5.00 4.95 4.91 4.89 4.90 4.94 4.99 5.02 5.06							
29	X	X	X	5.26 <u>5.24</u> 5.19 5.14 <u>5.09</u> 5.09 5.12 <u>5.17</u> 5.17	X	X	X	X	
30				5.47 5.41 5.37 5.38					
31									
32									
33	X	X	X	X	X	X	X	X	
Y									

Рис. 3. Расстановка топливных детекторов: **7.00** – экспериментальное значение в узловой точке; X – узловые точки

Для устранения резких перепадов значений энерговыделения между зонами профилирования и сглаживания функции [9] выполняется нормирование по массе ^{235}U , что позволяет получить распределение удельного энерговыделения. Для определения значений удельного энерговыделения в недостающих 41 (из 81) узловых точках используется полиномиальная аппроксимация и экстраполяция по столбцам и строкам

решетки. Для выполнения интерполяции задаются координаты всех твэлов, входящих в измерительную секцию. В результате интерполяции строится картограмма восстановленного поля удельного энерговыделения по сечению измерительной секции. Для получения конечной картограммы поля энерговыделения каждое значение удельного энерговыделения умножается на величину содержания ^{235}U в соответствующем твэле или топливном детекторе секции.

Исходные данные в программе вводятся оператором из трех внешних файлов. В первый файл (NU1.DAT) заносятся измеренные значения удельного энерговыделения в сорока топливных детекторах с указанием координат их расположения в секции. Второй файл (NUK.DAT) содержит значения содержания ^{235}U в 468+7 твэлах измерительной секции. Дополнительные семь твэлов имитируют центральный стержень из циркония. Третий файл (NU.DAT) содержит массив координат и количество твэлов в измерительной секции.

В результате работы программы будут получены следующие картограммы:

- удельного (на грамм ^{235}U) относительного энерговыделения в 468+7 точках по сечению измерительной секции (файл NU4.DAT);
- относительного энерговыделения в 468+7 точках по сечению измерительной секции (файл NE2.DAT).

Значения в картограммах нормированы на среднее энерговыделение (6.00) по всем 468-м точкам.

Верификация программы

Верификация программы заключалась в проверке точности метода восстановления значений энерговыделения. Для этого был проведен нейтронно-физический расчет энерговыделения с помощью кода MCNP с библиотекой ядерных констант ENDF/BVII.0 и модели реактора ИВГ.1М [10 – 12]. В модели исследуемые ТВС разбивались по высоте на секции длиной 10 см. Секция, расположенная на уровне 30 – 40 см от нижнего торца ТВС, являлась измерительной. В объеме каждой секции были смоделированы 468 твэлов ВОТК-НОУ. Моделирование выполнено с параметрами: 20 неактивных циклов, 200 активных циклов, 500 000 нейтронов на цикл.

На рисунке 4 представлено расчетное радиальное распределение энерговыделения в измерительной секции ТВС 1-го ряда ВОТК для вертикального и горизонтального сечений секции. Вертикальное сечение проходит через оси реактора и ТВС в направлении от периферии активной зоны к центру. Статистическая погрешность расчета энерговыделения в твэле составляет 0,4% при доверительной вероятности 0,95.

Расчетные значения для сорока узловых точек, нормированные на содержание ^{235}U , были использованы для восстановления поля энерговыделения в программе ENREDI. Содержание ^{235}U в твэлах соответствовало значению, принятому в модели реактора ИВГ.1М с НОУ-топливом. Восстановленные значения относительного энерговыделения в ТВС сравнивались с расчетными данными, полученными с помощью MCNP. На рисунке 5 представлены результаты сравнения для измерительной секции ТВС 1-го ряда ВОТК. Наибольшие отклонения (до 5%) выявлены для твэлов, находящихся на периферии секции. Заниженное восстановление значений наблюдается в областях, где количество узловых точек в строках решетки минимально.

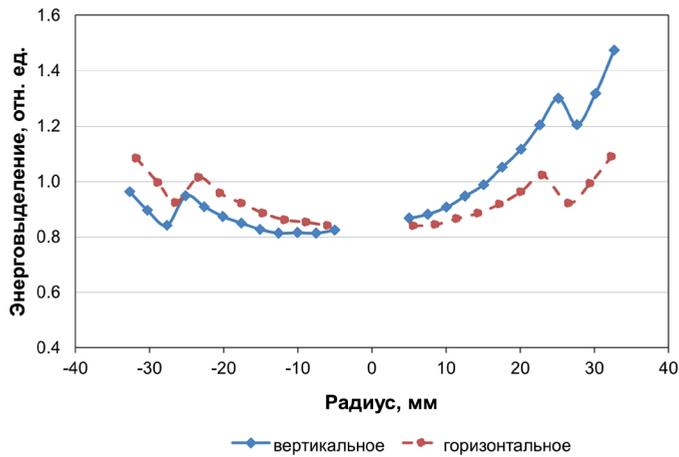


Рис. 4. Радиальное распределение энерговыведения в измерительной секции топливной сборки 1-го ряда, полученное в результате нейтронно-физического расчета

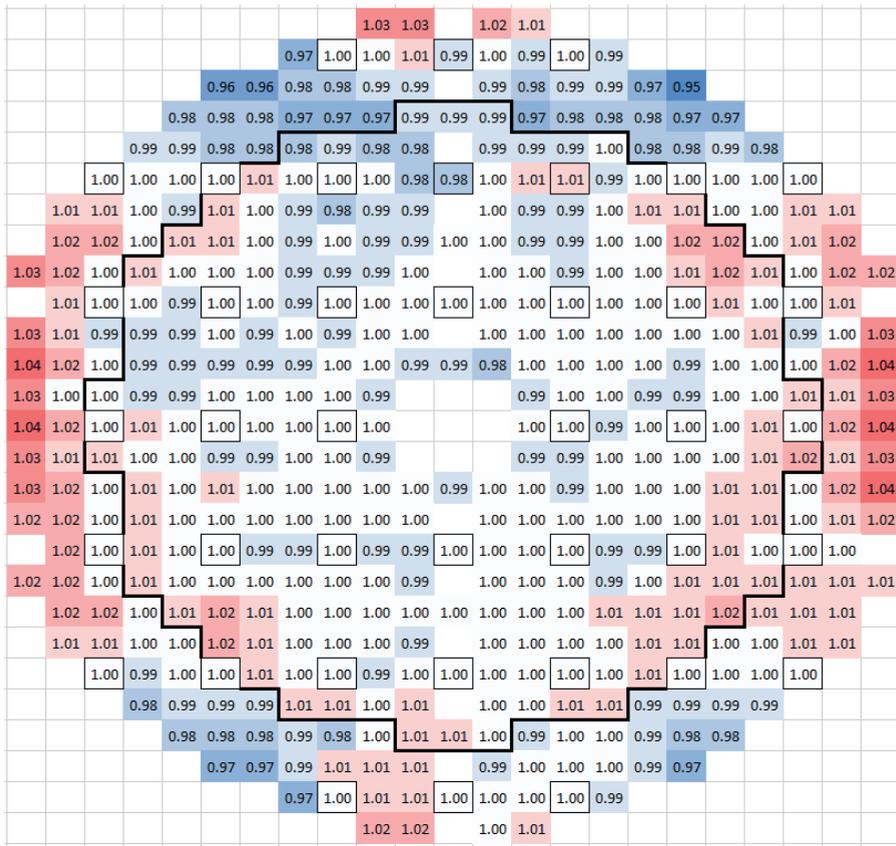


Рис. 5. Отклонения восстановленных значений энерговыведения от результатов моделирования, 1.00 – узловые точки

Поскольку картограммы полей энерговыведения используются для определения абсолютной мощности ТВС, дополнительно проведена верификация по радиально-

му коэффициенту. Согласно методике исследований [8], радиальный коэффициент представляет собой отношение интегрального энерговыделения в измерительной секции к энерговыделению в реперном топливном детекторе, в котором измеряется абсолютная скорость делений:

$$K_{R_k} = \frac{\sum_{i=1}^{468} q_i}{q_k}, \tag{1}$$

где q_i – энерговыделение в i -том твэле измерительной секции; q_k – энерговыделение в k -том реперном топливном детекторе измерительной секции. Для верификации были выбраны топливные детекторы с номерами $k = 5, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 16$ согласно схеме на рис. 2б.

Относительная погрешность определения коэффициента K_R рассчитывалась по формуле

$$\delta \bar{K}_R = \frac{S(\bar{K}_R)}{\bar{K}_{R(MCNP)}} \cdot 100\%, \tag{2}$$

$$S(\bar{K}_R) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{R(MCNP)_i} - K_{R(ENREDI)_i})^2}{n \cdot (n-1)}},$$

где $S(\bar{K}_R)$ – среднее квадратическое отклонение среднего значения радиального коэффициента $K_{R(ENREDI)_i}$ определенного по $n = 8$ реперным топливным детекторам.

В таблице 2 представлены исходные данные для расчета относительной погрешности $\delta \bar{K}_R$ и результаты расчета радиальных коэффициентов $K_{R(ENREDI)}$ и $K_{R(MCNP)}$.

Согласно результатам расчета, алгоритм вычислений программой ENREDI обеспечивает получение радиального коэффициента с точностью до 0,4% при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 2

Исходные данные для расчета $\delta \bar{K}_R$ для измерительной секции топливной сборки 1-го и 3-го рядов ВОТК

№ детектора Параметр	5	6	7	10	11	14	15	16
	1-ый ряд ВОТК							
$K_{R(ENREDI)}$	560.5	575.4	562.7	549.5	556.0	505.0	517.1	505.9
$K_{R(MCNP)}$	558.4	574.9	560.9	554.8	554.4	504.3	517.8	504.9
$S(\bar{K}_R)$	0.73							
3-ий ряд ВОТК								
$K_{R(ENREDI)}$	561.6	579.0	562.7	556.0	560.5	516.2	528.8	511.5
$K_{R(MCNP)}$	562.1	580.6	563.0	557.7	560.1	515.0	528.1	513.9
$S(\bar{K}_R)$	0.25							

Применение программы для исследований на физическом пуске реактора ИВГ.1М с НОУ-топливом

Для получения распределения энерговыделения по сечению ТВС каждого ряда ВОРК проведены облучательные эксперименты с использованием топливных детекторов, установленных в физические макеты ТВС. Облучение макетов проводилось на мощности реакторного пуска 400 Вт в течение 1000 с. Гамма-спектрометрические измерения относительного энерговыделения (интенсивности гамма-излучения) облученных топливных детекторов проводились с помощью двух идентичных сцинтилляционных гамма-спектрометров с детекторами типа NaI с размерами кристалла $2' \times 2'$.

В качестве исходных данных в программе ENREDI использовались значения относительного удельного энерговыделения в сорока топливных детекторах каждого физического макета, рассчитанные по формуле

$$q_i = \frac{I_i}{I_r} \cdot \frac{1}{C_{U_i}}, \quad (3)$$

где I_i – интенсивность гамма-излучения i -ого топливного детектора, измеренная с помощью сцинтилляционного детектора № 1, имп/с;

I_r – интенсивность гамма-излучения реперного топливного детектора, имп/с; величина I_r измерялась с помощью сцинтилляционного детектора № 2 во время параллельного измерения i -ого топливного детектора сцинтилляционным детектором № 1;

C_{U_i} – содержание ^{235}U в i -ом топливном детекторе, нормированное на среднюю массу ^{235}U в твэле периферийной зоны профилирования измерительной секции, отн.ед.

Содержание ^{235}U в топливных детекторах определено до проведения облучения по измерениям естественной активности гамма-излучения с помощью ранее упомянутых сцинтилляционных гамма-спектрометров. Масса ^{235}U в твэлах центральной и периферийной зон профилирования измерительной секции задавалась согласно паспортным данным на физические макеты ТВС.

На рисунке 6 приведена картограмма относительного энерговыделения, полученная по результатам работы программы ENREDI на примере ТВС первого ряда ВОРК. Узловые точки (топливные детекторы) выделены серым цветом. Среднее значение энерговыделения по сечению ТВС – 6.00.

Согласно картограмме на рис. 6, значение радиального коэффициента неравномерности энерговыделения составило $9.10/6.00=1.52$. Значение относительного энерговыделения в реперном топливном детекторе № 10 центральной зоны профилирования составило $5.12/6.00=0.85$.

Полученные результаты были использованы в отчете по физическому пуску исследовательского реактора ИВГ.1М с НОУ-топливом.

Заключение

Разработана программа восстановления распределения относительного энерговыделения в 468-ми твэлах ТВС реактора ИВГ.1М, основанная на многоинтервальной квадратичной интерполяции функции двух переменных. С помощью нейтронно-фи-

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан на 2024–2026 годы» [ИРН-BR24792713].

Литература

1. Sabitova R.R., Popov Y.A., Irkimbekov R.A., Bedenko S.V., Prozorova I.V., Svetachev S.N., Medetbekov B.S. Experimental studies of power distribution in LEU-fuel of the IVG.1M reactor. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023;200:110942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110942>
2. Сабитова Р.Р., Попов Ю.А., Иркимбеков Р.А., Прозорова И.В., Беденко С.В. Расчетные и экспериментальные данные о профиле энерговыделения в твс реактора ИВГ.1М после снижения обогащения топлива. *Вестник НЯЦ РК*. 2023;1:83–87. DOI: <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-83-87>
3. Svetachev S.N., Popov Yu.A., Sabitova R.R., Bedenko S.V., Prozorova I.V., Medetbekov B.S. Experimental studies of fission product release from model fuel elements at the physical start-up of the IVG.1M research reactor. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023;201:111023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.111023>
4. Sabitova R., Popov Y, Irkimbekov R., Prozorova I., Derbyshev I., Nurzhanov E., Surayev A., Gnyrya V., Azimkhanov A. Results of Experiments under the Physical Start-Up Program of the IVG.1M Reactor. *Energies*. 2023;16(17):6263. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176263>
5. Лобко В.Н. Математические методы в химии и химической технологии. Численные методы решения алгебраических задач и обработки функций: учебное пособие. Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Владимир, Изд-во ВлГУ, 2019, 144 с.
6. Александров С.И. Разработка и оптимизация методик, констант и программных средств контроля распределения энерговыделения в реакторе РБМК-1000. Дисс. (канд. техн. наук), 05.14.03. М.: АО «НИКИЭТ», 2022, 144 с.
7. Артемов В.Г. и др. Сопряженные нейтронно-физический и теплогидравлический расчеты при анализе температурного состояния твэлов. *Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок*. 2016;3:37–47. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27687246_58464486.pdf (дата обращения 18.10.2024).
8. Sabitova R.R., Prozorova I.V., Irkimbekov R.A., Popov Yu.A., Bedenko S.V., Prozorov A.A., Mukhamediyev A.K. Methods to study power density distribution in the IVG.1M research reactor after conversion. *Applied Radiation and Isotopes*. 2022;185:110259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110259>
9. Grachev E.V., Shevelev Y.V. Processing the readings of in-pile heat release detectors (№ IAE-4449/4). Gosudarstvennyj Komitet po Ispol'zovaniyu Atomnoj Energii SSSR, 1987.
10. Иркимбеков Р.А. и др. Нейтронно-физическая модель реактора ИВГ.1М: разработка и верификация по критическому состоянию. *Атомная энергия*. 2019;127(2):63–69. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2591> (дата обращения 08.10.2024).
11. Irkimbekov R.A., Vurim A.D., Bedenko S.V., Vlaskin G.N., Surayev A.S., Vityuk G.A., Vega-Carrillo H.R. Estimating the neutron component of radiation properties of the IVG.1M research reactor irradiated low-enriched fuel. *Applied Radiation and Isotopes*. 2022;181:110094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110094>
12. Brown F.B., Barrett R.F., Booth T.E., Bull J.S., Cox L.J., Forster R.A., Goorley T.J., Mosteller R.D., Post S.E., Prael R.E., Selcow E.C., Sood A., Sweezy J. MCNP version 5. *Trans. Am. Nucl. Soc.* 2002;87(273). URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2002_LANL_LA-UR-02-3199_BoothBrownEtAl.pdf (дата обращения 10.10.2024).

Поступила в редакцию 18.11.2024

Поступила после доработки 18.03.2025

Принята к опубликованию 15.04.2025

АвторыСабитова Радмила Радиковна, младший научный сотрудник,

E-mail: sabitovar@nnc.kz

Попов Юрий Анатольевич, заместитель начальника лаборатории,

E-mail: Popov@nnc.kz

Иркимбеков Руслан Александрович, начальник лаборатории, PhD,

E-mail: irkimbekov@nnc.kz

Беденко Сергей Владимирович, доцент, к.ф.-м.н.,

E-mail: bedenko@tpu.ru

Прозорова Ирина Валентиновна, начальник лаборатории,

E-mail: Prozorova@nnc.kz

Светачев Станислав Николаевич, инженер,

E-mail: svetach@nnc.kz

Медетбеков Берик Сакенович, младший научный сотрудник,

E-mail: medetbekov@nnc.kz

UDC 621.039.5

Program for Reconstructing the Relative Power Distribution in the Fuel Assembly of the IVG.1M Reactor. Verification and Application**Sabitova R.R.¹, Popov Yu.A.¹, Irkimbekov R.A.¹, Bedenko S.V.², Prozorova I.V.^{1,2}, Svetachev S.N.¹, Medetbekov B.S.¹**¹ *Institute of Atomic Energy of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, 10 Beybit Atom St., 071100 Kurchatov, Kazakhstan*² *National Research Tomsk Polytechnic University, 2 Lenin Av., 634050 Tomsk, Russia***Abstract**

Physical studies on the radial energy release distribution in the fuel assembly of the IVG.1M research reactor were conducted during the reactor's physical start-up phase after its conversion to low-enriched uranium (LEU) fuel. The research methodology involved irradiation experiments on physical mockups of LEU fuel assemblies within the reactor core, followed by measurements of gamma activity in irradiated fuel elements of the mockup. Since such studies involve dose loads on personnel, minimisation of labour and time costs is essential. This was achieved by reducing the number of measured fuel rods and reconstructing the nodal (rod-by-rod) energy release non-uniformity across the fuel assembly using the developed ENREDI program. The program employs polynomial approximation-interpolation at uniformly arranged nodal points and accounts for two-zone radial fuel profiling. This approach enabled the determination of the energy release non-uniformity factor and supported further calculations of the assembly's absolute power. This work focuses on the description and verification of the ENREDI program through neutron-physical simulation with MCNP5, along with findings from the physical studies.

This work focuses on the description and verification of the ENREDI program through neutron-physical simulation with MCNP5, along with findings from the physical studies. According to the verification results, the ENREDI program's calculation algorithm reliably reconstructs the energy release field across the fuel assembly cross-section, with a maximum reconstruction error of 5% for peripheral fuel elements. Some underestimation of values is observed in areas with fewer nodal points in lattice rows, indicating potential improvements in accuracy for these specific regions.

Keywords: LEU fuel, energy release, interpolation, energy release field recovery, IVG.1M reactor.

For citation: Sabitova R.R., Popov Yu.A., Irkimbekov R.A., Bedenko S.V., Prozorova I.V., Svetachev S.N., Medetbekov B.S. Program for Reconstructing the Relative Power Distribution in the Fuel Assembly of the IVG.1M Reactor. Verification and Application. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:167–179. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.14> (in Russian).

References

1. Sabitova R.R., Popov Y.A., Irkimbekov R.A., Bedenko S.V., Prozorova I.V., Svetachev S.N., Medetbekov B.S. Experimental studies of power distribution in LEU-fuel of the IVG.1M reactor. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023;200:110942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110942>
2. Sabitova R.R., Popov Yu.A., Irkimbekov R.A., Prozorova I.V., Bedenko S.V. Calculated and experimental data on energy release profile in the fuel assembly of the IVG.1M reactor after fuel enrichment reduction. *NNC RK Bulletin*. 2023;1:83–87. DOI: <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-1-83-87> (in Russian).
3. Svetachev S.N., Popov Y.A., Sabitova R.R., Bedenko S.V., Prozorova I.V., Medetbekov B.S. Experimental studies of fission product release from model fuel elements at the physical start-up of the IVG.1M research reactor. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023;201:111023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.111023>
4. Sabitova R., Popov Y., Irkimbekov R., Prozorova I., Derbyshev I., Nurzhanov E., Surayev A., Gnyrya V., Azimkhanov A. Results of experiments under the physical start-up program of the IVG.1M reactor. *Energies*. 2023;16(17):6263. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176263>
5. Lobko V.N. *Mathematical methods in chemistry and chemical technology: Numerical methods for solving algebraic problems and processing functions*. Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU). Vladimir, VLGU Publ., 2019, 144 p. (in Russian).
6. Alexandrov S.I. *Development and optimization of methods, constants, and software tools for monitoring power distribution in the RBMK-1000 reactor*. Diss. Cand. Sci. (Engineering), Moscow, NIKIET JSC, 2022, 144 p. (in Russian).
7. Artemov V.G., Artemova L.M., Korotaev V.G., Mikheev P.A., Shemaev Yu.P. Coupled neutron-physical and thermal-hydraulic calculations in the analysis of the temperature state of fuel elements. *Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies*. 2016;3:37–47. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_27687246_58464486.pdf (accessed Oct. 18, 2024) (in Russian).
8. Sabitova R.R., Prozorova I.V., Irkimbekov R.A., Popov Y.A., Bedenko S.V., Prozorov A.A., Mukhamediyev A.K. Methods to study power density distribution in the IVG.1M research reactor after conversion. *Applied Radiation and Isotopes*. 2022;185:110259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110259>
9. Grachev E.V., Shevelev Y.V. Processing the readings of in-pile heat release detectors (No. IAE-4449/4). Gosudarstvennyj Komitet po Ispol'zovaniyu Atomnoj Energii SSSR, 1987 (in Russian).

10. Irkimbekov R., Zhagiparova L., Kotov V., Vurim A., Gnyrya V. Neutronics Model of the IVG.1M Reactor: Development and Critical-State Verification. *Atomic energy*. 2019;127(2):69–76. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00587-1>
11. Irkimbekov R.A., Vurim A.D., Bedenko S.V., Vlaskin G.N., Surayev A.S., Vityuk G.A., Vega-Carrillo H.R. Estimating the neutron component of radiation properties of the IVG.1M research reactor irradiated low-enriched fuel. *Applied Radiation and Isotopes*. 2022;181:110094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110094>
12. Brown F.B., Barrett R.F., Booth T.E., Bull J.S., Cox L.J., Forster R.A., Goorley T.J., Mosteller R.D., Post S.E., Prael R.E., Selcow E.C., Sood A., Sweezy J. MCNP version 5. *Trans. Am. Nucl. Soc.* 2002;87(273). URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2002_LANL_LA-UR-02-3199_BoothBrownEtAl.pdf (accessed Oct. 10, 2024).

Authors

Radmila R. Sabitova, Junior Researcher,

E-mail: sabitovar@nnc.kz

Yuri A. Popov, Deputy Head of Laboratory,

E-mail: Popov@nnc.kz

Ruslan A. Irkimbekov, Head of Laboratory, PhD,

E-mail: irkimbekov@nnc.kz

Sergey V. Bedenko, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: bedenko@tpu.ru

Irina V. Prozorova, Head of Laboratory,

E-mail: Prozorova@nnc.kz

Stanislav N. Svetachev, Engineer,

E-mail: svetach@nnc.kz

Berik S. Medetbekov, Junior Researcher,

E-mail: medetbekov@nnc.kz