

УДК 621.039

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РЕАКТОРЕ ИГР С ТВЭЛОМ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Котов В.М., Жанболатов О.М.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Долгосрочное развитие атомной промышленности связано с реакторами на быстрых нейтронах. Одним из приоритетных вопросов является безопасность реакторов даже в случае аварийных ситуаций. В обоснование безопасности необходимы исследования поведения элементов реактора в экспериментах. Такие работы с успехом ведутся на реакторе ИГР. Одним из путей расширения возможностей ИГР является установка в его центральный экспериментальный канал (ЦЭК) преобразователя спектра тепловых нейтронов реактора в быстрые.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей развития атомной промышленности является улучшение технологии быстрых реакторов. Для этих целей необходимо проведение экспериментов с топливом, работающим на быстрых нейтронах. Однако в тепловом реакторе, таком как ИГР, сложно получить равномерный поток быстрых нейтронов. Одним из вариантов уменьшения неравномерности является предлагаемое устройство – конвертер нейтронов, способное решить данную проблему.

В данной работе ставится задача создания условий для повышения доли быстрых нейтронов в твэлах быстрого реактора, испытываемых в ИГР. Рассмотрены имеющиеся в печати аналогичные решения. Выбрано направление создания и совершенствования конвертора тепловых нейтронов ИГР в быстрые. Рассмотрено несколько вариантов конструкции конвертора и рассчитаны их характеристики. В качестве топлива для испытываемого твэла выбрано смешанное оксидное уран-плутониевое топливо (МОКС-топливо), поскольку является одним из приоритетных вариантов для использования в быстрых реакторах. Данный вид топлива обладает хорошими нейтронно-физическими и технологическими характеристиками

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимым условием при создании новых ядерных реакторов на быстрых нейтронах является обоснование безопасности их твэлов в случаях возникновения аварийных ситуаций. В реакторе ИГР успешно реализуются эксперименты, моделирующие данные аварийные ситуации. К примеру, возможна кратковременная реализация режимов с повышением мощности твэла до требуемых значений, режимов прекращения циркуляции теплоносителя. В случаях с твэлами тепловых реакторов, такие эксперименты реализуются с высокой степенью приближения к расчетным характеристикам, поскольку спектр нейтронов в ИГР является преимущественно тепловым. Однако, твэлы быстрых реакторов имеют отличия в нейтронно-физических характеристиках, в частности, в зависимости энерговыделения по радиусу топлива. К примеру, в ходе решения задачи вычисления ради-

ального распределения энерговыделения в МОКС-топливе по проекту MYRRHA была выявлена большая неравномерность от периферии к центру твэла [1]. Данные обстоятельства затрудняют испытания твэлов на быстрых нейтронах на реакторе ИГР.

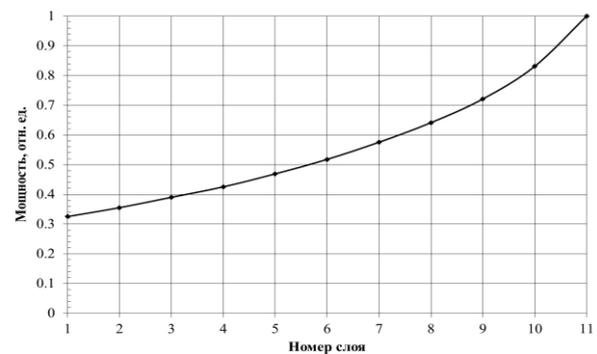


Рисунок 1. Радиальное распределение мощности в МОКС-топливе (нумерация слоев начинается от центра твэла)

Вариантом решения данной проблемы является применение конвертора спектра для повышения доли быстрых нейтронов в испытываемом твэле.

В качестве топлива для испытываемого твэла выбрано смешанное оксидное уран-плутониевое топливо (МОКС-топливо), поскольку является одним из приоритетных вариантов для использования в быстрых реакторах. Данный вид топлива обладает хорошими нейтронно-физическими и технологическими характеристиками. В таблице 1 представлены характеристики твэла, использованные в расчетах.

Таблица 1. Изотопный состав твэла быстрого реактора

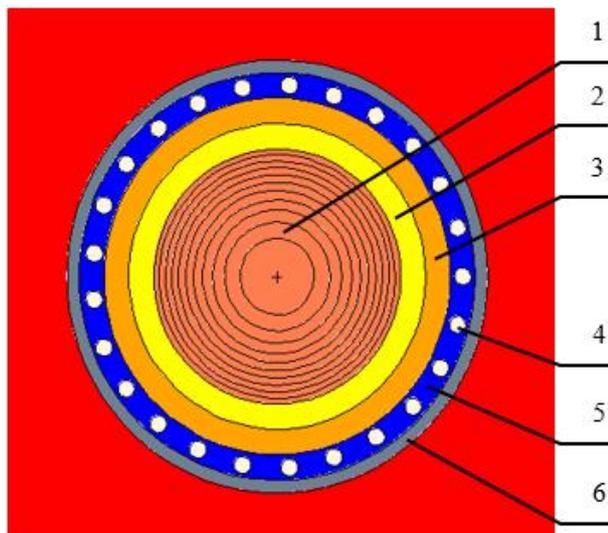
Параметр	Значение
UO ₂	85 % в смеси
U ²³⁵ в уране	18 %
U ²³⁸ в уране	82 %
PuO ₂	15 % в смеси
Pu ²³⁹ в плутонии	80
Pu ²⁴⁰ в плутонии	10
Pu ²⁴¹ в плутонии	10
Высота, мм	100 мм
Плотность, г/см ³	11,0

Расчеты выполнялись с использованием расчетного кода MCNP/5 с библиотекой ENDF/B-VI [2]. Для проведения расчетов были разработаны модели, созданные на базе бенчмарк модели ИГР [3].

КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА

Вариант с приближенными вспомогательными твэлами

В качестве исходного варианта использована схема конвертора [4], представленная на рисунке 2.



1 – твэл с МОКС-топливом, 2 – теплоноситель быстрого реактора, 3 – поглотитель, 4 – вспомогательные твэлы, 5 – замедлитель нейтронов, 6 – корпус устройства

Рисунок 2. Вариант 1 схемы конвертора

В таблице 2 представлены изотопный состав и размеры топливных элементов конструкции, в таблице 3 – характеристики конструкции данного варианта.

Были рассчитаны энерговыделения в топливных элементах конструкции данного варианта, которые представлены в таблице 4. Данные взяты из выходного файла программы MCNP5.

Таблица 2. Геометрия и состав твэлов 1 варианта

Параметр	Твэл быстрого реактора	Вспомогательные твэлы
UO ₂ в смеси	85 %	100 %
U ²³⁵ в уране	4 %	17 %
U ²³⁸ в уране	96 %	83 %
PuO ₂ в смеси	15 %	
Pu ²³⁹ в плутонии	80 %	
Pu ²⁴⁰ в плутонии	10 %	
Pu ²⁴¹ в плутонии	10 %	
Диаметр, мм	10	0,7
Высота, мм	1000	
Радиус размещения, мм		7,5
Плотность, г/см ³	11,073	10,5
Количество	1	25

Таблица 3. Геометрия и состав конструкционных элементов варианта 1

Параметр	Эвтектика	Поглотитель	Циркониевый корпус
Состав	свинец 100 %	гадолиний 100 %	цирконий – 99 % ниобий – 1 %
Радиус внутр., мм	5	6	8
Радиус наружн., мм	6	7	9
Высота, мм	1000		

Таблица 4. Данные мощностей в варианте 1

Вид топлива	Нуклид	Доля захваченных нейтронов	Доля нейтронов в реакции деления	W, о.е.
МОКС-топливо	92235,60с	2,16×10 ⁻⁵	4,44×10 ⁻⁵	1
	94239,66с	7,09×10 ⁻⁵	1,32×10 ⁻⁴	
	92238,60с	1,01×10 ⁻⁴	8,76×10 ⁻⁶	
	94240,66с	6,70×10 ⁻⁵	8,41×10 ⁻⁷	
Урановые твэлы	92235,61с	1,34×10 ⁻⁴	7,25×10 ⁻⁴	3,20
	92238,61с	4,40×10 ⁻⁵	1,32×10 ⁻⁶	
Уран в реакторе ИГР	92235,70с	7,93×10 ⁻²	4,09×10 ⁻¹	1,80×10 ³
	92238,70с	2,81×10 ⁻³	8,46×10 ⁻⁶	

Из таблицы 4 видно, что в данном варианте конструкции во вспомогательных твэлах выделяется 0,17 % мощности реактора, а в центральном твэле 31,25 % мощности вспомогательных твэлов. Приближение вспомогательных твэлов и поглотителя к испытываемому твэлу создает некоторое повышение энерговыделения в данном твэле, но общий эффект остается незначительным.

В связи с этим, возникла необходимость решения следующих задач:

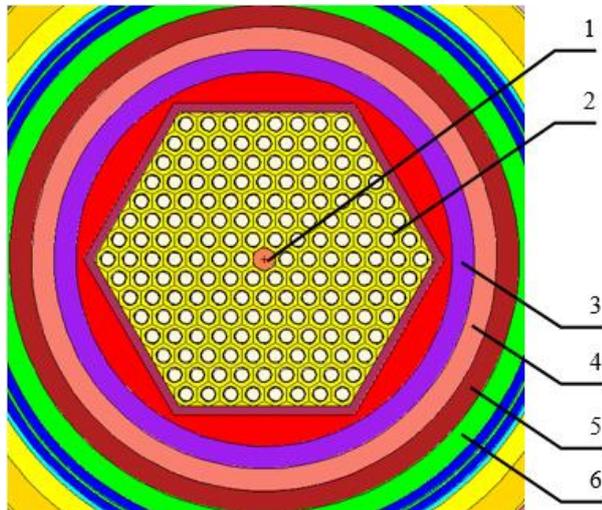
- разработка вариантов конверторов, отличающихся схемой, числом вспомогательных твэлов, характеристиками поглощающих элементов;
- проведение нейтронно-физических расчетов – определение распределения нейтронов и энерговыделения в элементах конвертора, спектра нейтронов в ИГР и элементах конвертора;
- анализ возможностей совершенствования исследуемых вариантов.

Вариант с ТВС быстрого реактора

В результате перебора разных вариантов схем конвертора, была разработана конструкция, основанная на размещении внутри ЦЭК ИГР тепловыделяющей сборки твэлов с теплоносителем быстрого реактора [5]. Испытываемый твэл быстрого реактора располагается в центре ТВС. Также внутри ЦЭК были установлены цилиндры из графита, поглотителя и нержавеющей стали толщиной 10 мм. На рисунке 3 представлена данная схема конвертора.

Расчеты показали малый коэффициент размножения такой сборки и, соответственно, малую долю энерговыделения в испытываемом твэле относительно

но энерговыделения в реакторе. Следовательно, следующий шаг «модернизации» конвертора заключался в уменьшении числа вспомогательных твэлов быстрой сборки (последовательно со 168 до 6) и усилении экранирования тепловых нейтронов за счет поглотителя, вынесенного за внешний диаметр сборки.



1 – испытываемый твэл быстрого реактора, 2 – ТВС быстрого реактора, 3 – нержавеющая сталь, 4 – поглотитель, 5 – графит, 6 – корпус НА228

Рисунок 3. Схема с ТВС быстрого реактора

Максимальный эффект увеличения мощности испытываемого твэла достигался при минимальном числе

вспомогательных твэлов. На рисунке 4 представлен вариант такого конвертора, установленного в ЦЭК ИГР.

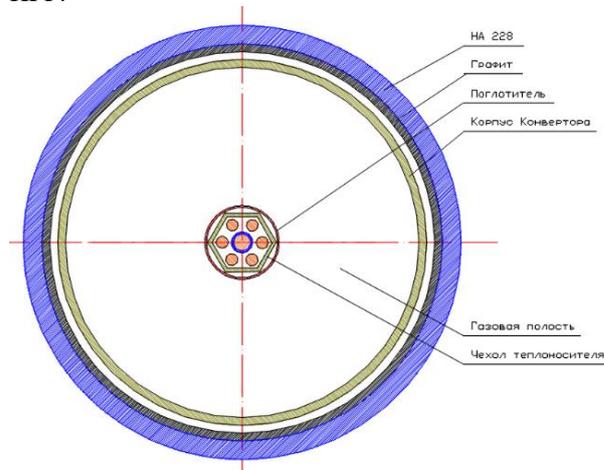


Рисунок 4. Вариант с внутренним слоем поглотителя

В таблице 5 представлены характеристики варианта с поглотителем, установленным вокруг сборки вспомогательных твэлов, отличающихся материалом поглотителя и его толщиной. Варианты поглотителей выбраны исходя из максимума их сечений поглощения в библиотеке сечений MCNP5.

Полученные данные говорят о сложности процессов преобразования спектра нейтронов в конверторе ИГР.

Таблица 5. Характеристики конверторов с внутренним слоем поглотителей

Параметр		Вариант				
		1	2	3	4	5
Поглотитель нейтронов		гадолиний			кадмий	
Толщина поглотителя, мм		1,0	0,5	0,25	0,5	0,25
Мощность объектов	МОКС-твэл	1				
	вспомогательные твэлы	2,05	2,01	2,05	2,02	2,04
	ИГР	2253	1898	1719	1793	1600
Мощность, вызываемая нейтронами	тепловые	0,53 %	2,2 %	5,58 %	0,59 %	6,5 %
	промежуточные	89,1 %	88,68 %	85,65 %	90,64 %	85,03 %
	быстрые	10,36	9,12 %	8,77 %	8,77 %	8,47 %
Отношение $W(R_{min}) / W(R_{max})$		0,75	0,65	0,59	0,71	0,65
Отношение удельной мощности твэла к мощности реактора, 1/г		$5,11 \times 10^{-7}$	$6,07 \times 10^{-7}$	$6,7 \times 10^{-7}$	$6,42 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-7}$
Отношение удельной мощности вспомогательного твэла к мощности реактора, 1/г		$5,28 \times 10^{-7}$	$6,15 \times 10^{-7}$	$6,92 \times 10^{-7}$	$6,54 \times 10^{-7}$	$7,4 \times 10^{-7}$
Вес устройства, β		13,10044	12,78997	12,16363	12,40534	12,12967

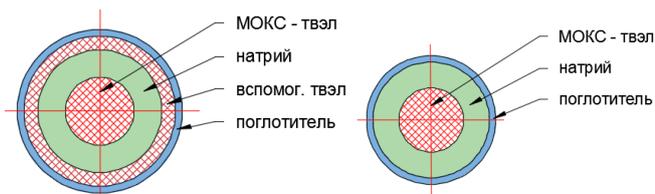


Рисунок 5. Модель с кольцевым вспомогательным твэлом и ее аналог

Для выяснения роли вспомогательных твэлов были построены модель с цилиндрическим вспомогательным твэлом и ее аналог без вспомогательного твэла, представленные на рисунке 5. Вспомогательный твэл состоит из диоксида урана ($^{235}\text{U} - 4\%$, $^{238}\text{U} - 96\%$) с толщиной 2 мм. В качестве поглотителя тепловых нейтронов использовался природный бор. Результаты расчетов нейтронно-физических характеристик с различной толщиной приведены в таблице 6.

Таблица 6. Характеристики кольцевых конверторов

Параметр	Вариант	Конвертор 1		Конвертор 2	
	Мощность объектов	МОКС-ТВЭЛ	1,00		
вспомогательные		1,27	1,24	0	0
ИГР		2980	1906	2938	3649
Материал поглотителя нейтронов		природный бор			
Толщина поглотителя нейтронов, мм		1	0,5	1	1,5
Мощность, вызываемая нейтронами	тепловыми	2,84 %	18,03 %	3,67 %	2,32 %
	промежуточными	85,13 %	73,15 %	85,22 %	84,78 %
	быстрыми	12,04 %	8,81 %	11,11 %	12,91 %
Отношение $W(R_{min}) / W(R_{max})$		0,81	0,6	0,74	0,88

Видно, что по отношению мощностей ИГР/МОКС варианты с поглотителем толщиной 1 мм практически равноценны. По равномерности энерговыделения в МОКС ТВЭЛ вариант со вспомогательным ТВЭЛОМ существенно лучше. Также данный вариант имеет минимальную мощность вспомогательных ТВЭЛОВ среди рассмотренных ранее. Отсюда можно сделать вывод, что вспомогательные ТВЭЛЫ играют положительную роль в формировании спектра ней-

ЛИТЕРАТУРА

1. Витюк Г.А., Котов В.М., Витюк В.А., Жанболатов О.М. Расчет теплогидравлических параметров испытаний топлива быстрого реактора со свинцово - висмутовым теплоносителем. – Вестник НЯЦ РК, вып. 3, 2016, стр. 77–85.
2. MCNP/5: A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5, 2003.
3. Вурим А.Д., Котов В.М., Иркимбеков Р.А., Жагипарова Л.К., Байгожина А.А. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов. – А.с. № 2738 РК, 27.12.2016.
4. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертер нейтронов ИГР для испытаний ТВЭЛОВ быстрых реакторов. – Вестник НЯЦ РК, вып. 1, 2017, стр. 98–101.
5. V.M. Kotov, A.S. Sergeeva, R.A. Irkimbekov, V.I. Suprunov. The Possibilities of Fission Material Reproduction Increase in Thermal Reactor with the Assemblies with a Hard Neutron Spectrum/ Science and Technology of Nuclear Installations. 2011.

ЖЫЛДАМ РЕАКТОР ЖБЭЛДЕРІН СЫНАУҒА АРНАЛҒАН ИГР НЕЙТРОНДЫҚ КОНВЕРТОРЫ

В.М. Котов, О.М. Жанболатов

ҚР ҰАӨ РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

Атом саласын дамыту жолдарының бірі жылдам реакторлардың технологияларын жетілдіру болып табылады. Осы мақсаттар үшін жылдам нейтронды отынмен эксперименттер жүргізу қажеттілігі бар. Алайда, ИГР сияқты жылулық реакторда жылдам нейтрондардың бірыңғай ағымын алу қиын. Бірыңғайлық емес мәселесін шешудің бір амалы – ұсынылып отырған құрылғы, нейтрондық конвертор болып табылады.

CONVERTER OF IGR NEUTRONS FOR TESTING OF FAST REACTORS FUEL ELEMENTS

V.M. Kotov, O.M. Zhanbolatov

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

One of the ways to develop the nuclear industry is to improve the technology of fast reactors. For these purposes it is necessary to carry out experiments with fuels of fast reactors. However, in a thermal reactor such as GGR, it is difficult to obtain a uniform flux of fast neutrons. One of the options for reducing the unevenness of fast neutrons flux is the proposed device – a neutron converter, capable of solving this problem.