

УДК 621.039

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ИГР ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕЛЬНЫМИ ТВС

Кожабаев З.Б., Жагипарова Л.К., Иркимбеков Р.А.

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

В статье представлены результаты расчетов нейтронно-физических параметров экспериментального устройства, предназначенного для исследования процессов перемещения расплава материалов активной зоны в область с ограниченным количеством теплоносителя – расплава натрия, и его охлаждения при наличии остаточного энерговыделения в расплаве. Получены расчетные значения распределения энерговыделения по высоте модельной тепловыделяющей сборки. Дана оценка величины отношения энерговыделения в топливе и конструкционных материалах экспериментального устройства к энерговыделению в активной зоне реактора.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, решаемых при проведении экспериментов с модельными ТВС на реакторе ИГР, является выбор параметров его работы, обеспечивающих выполнение технических требований по реализации заданного энерговыделения в экспериментальном устройстве.

Параметры работы ИГР при проведении каждого конкретного эксперимента устанавливаются, исходя из соотношения энерговыделений. При этом задача выбора параметров осложняется тем, что это соотношение не является постоянным и изменяется в связи с зависимостью плотности потока нейтронов в экспериментальном канале от температуры активной зоны и положения органов регулирования.

Так как экспериментальное измерение величины соотношения энерговыделения в исследуемом устройстве и в реакторе во всем диапазоне рабочих параметров реактора невозможно, то для решения этой задачи выполнен ряд нейтронно-физических расчетов с использованием программы MCNP5 с библиотекой ENDF/B-VI [1].

При проведении расчетов и подготовке экспериментов по исследованию параметров течения и охлаждения расплава в натрии использовалась модель реактора ИГР [2], полностью соответствующая реальным размерно-материальным характеристикам реактора и учитывающая неравномерность распределения урана в объеме активной зоны, перемещение стержней регулирования в ходе пуска, динамику работы реактора с учетом неравномерности нагрева отдельных частей кладки [3]. В расчетной модели в центральный экспериментальный канал ИГР помещено исследуемое экспериментальное устройство (рисунок 1). Основные параметры экспериментального устройства представлены в таблице 1. В его состав входят модельная ТВС в чехле и камера приема расплава, в которой расплав охлаждается в процессе взаимодействия с натрием (рисунок 1).

Чехол ТВС, состоит из двухрядной сборки с 54 модельными твэлами, где внешний и внутренний ряды состоят из 30 и 24 твэлов, соответственно. Газоохлаждаемый стальной чехол является барьером,

снижающим тепловое воздействие на неподвижную ампулу и предотвращающим контактное взаимодействие топлива с ней [3]. ТВС помещена в графитовый кожух, состоящий из графитового стакана и графитовой крышки.

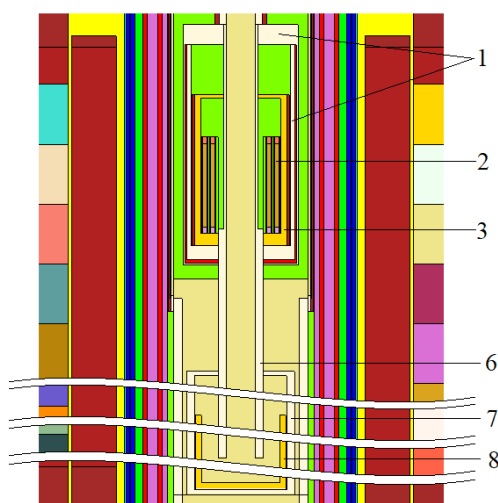
Таблица 1. Основные параметры экспериментального устройства

Наименование параметра	Значение
Топливо	диоксид урана
Содержание ^{235}U в топливе, %	
– в активной части	17
– в бланкетной части	0,27
Плотность, кг/м ³	
– в активной части	9702
– в бланкетной части	10759
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5
Длина топливного столба, мм	200
Длина активной части топливного столба, мм	185
Длина бланкетной части топливного столба, мм	15
Материал оболочки	12X18H10T
Наружный диаметр оболочки, мм	8
Внутренний диаметр оболочки, мм	6
Масса топливных таблеток ТВС, кг	2,702
Масса активной части топливных столбов, кг	2,479
Масса бланкетной части топливных столбов, кг	0,223

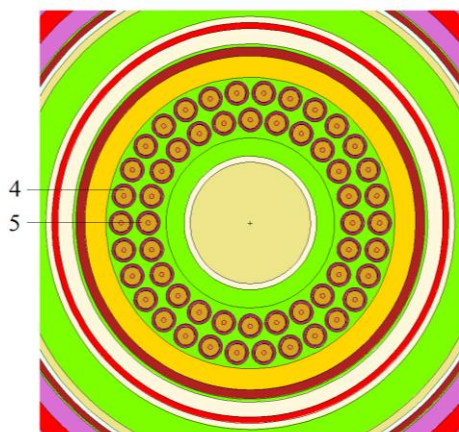
На рисунке 1 отметка «0» соответствует ЦАЗ реактора. Отметка «+400 мм» соответствует нижнему торцу твэлов в чехле ТВС. Отметка «–866 мм» соответствует нижнему торцу камеры приема расплава.



а) вертикальное сечение



б) вертикальное сечение экспериментального устройства



в) горизонтальное сечение ТВС

1 - внутренняя и внешняя стальные стенки тракта охлаждения чехла ТВС; 2 - твэлы; 3 - графитовый кожух ТВС; 4 - наружный ряд твэлов; 5 - внутренний ряд твэлов; 6 - центральная труба; 7 - камера приема расплава; 8 - графитовый стакан камеры приема расплава

Рисунок 1. Объединенная расчетная модель ИГР и экспериментального устройства

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Все вычисления выполнялись для холодного и горячего состояния реактора в предположении, что разогрев графитовой кладки и положение стержней регулирования реактора влияют на распределение энерговыделения в объеме испытываемого экспериментального устройства.

Предварительные расчетные оценки показали, что разогрев графитовой кладки может изменить величину отношения энерговыделения в топливе модельной ТВС к энерговыделению в реакторе на 10 % при реализации полного интеграла энерговыделения [5], а разогрев топлива и конструкционных материалов экспериментального устройства (при условии сохранения исходной конфигурации экспериментального устройства) может изменить значение отношения энерговыделения в топливе и в реакторе не более, чем на 1 % [6].

С целью определения высотного распределения энерговыделения в топливе и конструкционных материалах ТВС расчетная модель по высоте была разбита с шагом по 10 мм, начиная с уровня «-885 мм» и заканчивая уровнем «2195 мм» (рисунок 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Отношение энерговыделения в топливе и конструкционных материалах к энерговыделению в реакторе вычислено по формуле:

$$k = \frac{q}{Q} \cdot \frac{1}{m},$$

где q – энерговыделение в материале, МэВ/г; Q – энерговыделение в реакторе, МэВ/г; m – масса, г.

Критическое состояние реактора зависит от температуры кладки и достигается соответствующим положением регулирующих стержней [3].

На рисунках 2–3 представлено отношение энерговыделения в топливе ТВС и конструкционных материалах по высоте основных элементов экспериментального устройства для исходной конфигурации экспериментального устройства и при температуре кладки реактора ИГР, равной 800 К. Отметка «0» соответствует центру активной зоны реактора ИГР, а отметка «-665 мм» – нижнему торцу неподвижной части кладки активной зоны реактора ИГР. Сплошной линией показаны значения относительного энерговыделения в топливе для холодного реактора, и штрихпунктирной линией – для горячего реактора, соответственно.

По результатам расчетов среднее значение отношения энерговыделения в топливе ТВС к энерговыделению в ИГР для холодного реактора составило $(0,647 \pm 0,001) \cdot 10^{-6}$ 1/г(UO₂), а для горячего реактора – $(0,646 \pm 0,001) \cdot 10^{-6}$ 1/г(UO₂). Среднее значение отношения энерговыделения в активной части топлива ТВС к энерговыделению в реакторе для холодного реактора составило $(0,7 \pm 0,001) \cdot 10^{-6}$ 1/г(UO₂), а для горячего реактора – $(0,699 \pm 0,001) \cdot 10^{-6}$ 1/г(UO₂).

В бланкетной части топлива ТВС отношение энерговыделения для холодного реактора составило $(0,057 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ л/г(UO}_2\text{)}$, а для горячего реактора – $(0,058 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ л/г(UO}_2\text{)}$.

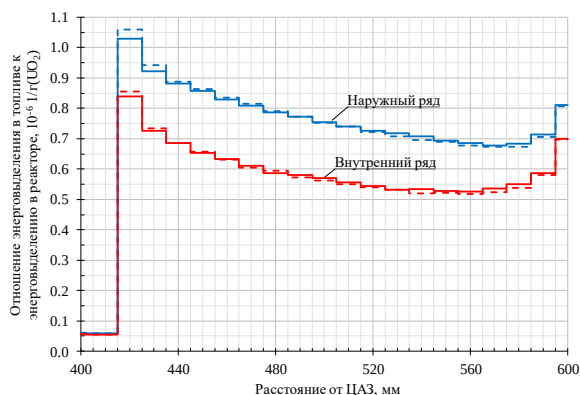
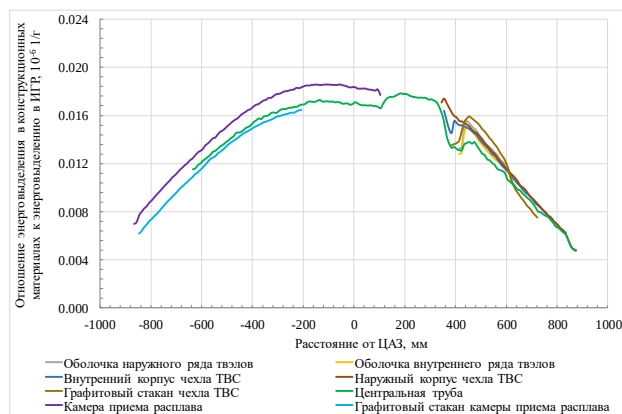
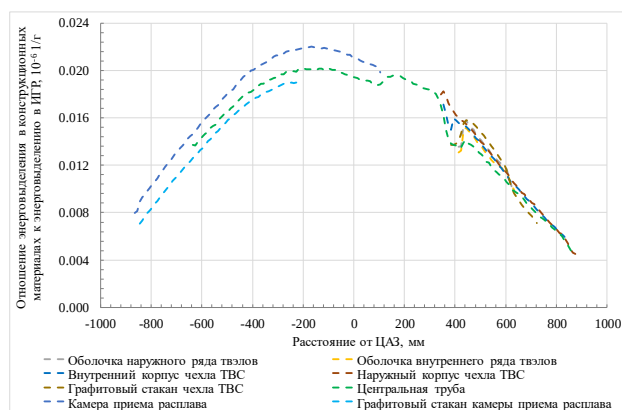


Рисунок 2. Отношение энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе по высоте экспериментального устройства



а) при холодном реакторе



б) при горячем реакторе

Рисунок 3. Отношение энерговыделения в конструкционных материалах к энерговыделению в ИГР по высоте экспериментального устройства

Результаты расчетов показали, что при увеличении температуры активной зоны отношение энерговыделения в топливе ТВС к энерговыделению в ИГР остается постоянным, что не согласуется с ранее полученными результатами для других экспериментальных устройств, в которых наблюдался рост относительного энерговыделения при разогреве кладки реактора. Это объясняется размещением ТВС в верхней части экспериментального канала а следовательно и АЗ ИГР, где зависимость плотности потока нейтронов от температуры активной зоны и положения органов регулирования является незначительной по сравнению плотностью потока нейтронов в центральной части активной зоны реактора ИГР.

Результаты расчетов указывают на заметный рост относительного энерговыделения в области от -400 до 400 мм для конструкционных материалов. Максимальная разница величины энерговыделения по высоте составила: в оболочке твэла – 2,31 %; в графитовом стакане чехла ТВС – 5,69 %; в корпусах чехла ТВС – 4,96 %; в центральной трубе – 17,19 %; в графитовом стакане камеры приема расплава – 14,78 %; в стальном чехле камеры приема расплава – 18,29 %.

Для исходной конфигурации экспериментального устройства и моделируемой температуре кладки реактора ИГР, равной 294 К и 800 К, отношение энерговыделения в натрии, находящемся в устройстве, к энерговыделению в реакторе составило для $(0,011 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ л/г}$ и $(0,013 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ л/г}$, соответственно.

В таблице 2 приведены значения отношения энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе по высоте топливного столба для исходной конфигурации экспериментального устройства при различных температурах кладки реактора ИГР (294 К и 800 К).

Диаграмма мощности реактора (синяя линия, рисунок 4) была получена в процессе экспериментальной отработки на модели реактора ИГР.

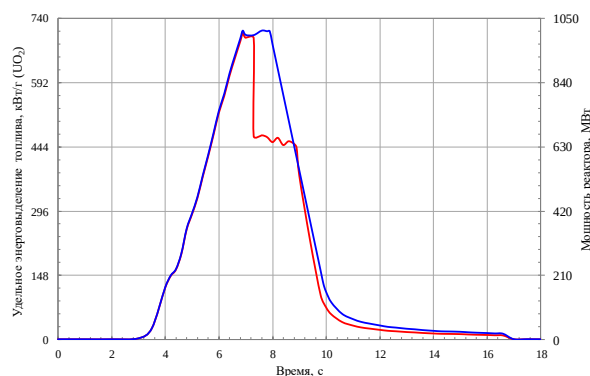


Рисунок 4. Диаграмма изменения мощности реактора и ТВС (с учетом разогрева кладки реактора ИГР и изменения конфигурации элементов экспериментального устройства в процессе эксперимента)

Таблица 2. Отношение энерговыделения в топливе модельной ТВС к энерговыделению в реакторе ИГР по высоте топливного столба

Высота топливного столба, мм	Отношение энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе, $(1 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} 1/\text{г}(\text{UO}_2)$			
	наружный ряд		внутренний ряд	
	294 К	800 К	294 К	800 К
400–405	0,060	0,061	0,056	0,057
405–415	0,058	0,060	0,054	0,055
415–425	1,029	1,060	0,840	0,856
425–435	0,923	0,942	0,725	0,733
435–445	0,883	0,888	0,687	0,685
445–455	0,857	0,863	0,653	0,657
455–465	0,829	0,836	0,632	0,632
465–475	0,810	0,815	0,611	0,605
475–485	0,786	0,790	0,587	0,594
485–495	0,772	0,773	0,580	0,573
495–505	0,754	0,753	0,570	0,563
505–515	0,739	0,741	0,556	0,550
515–525	0,726	0,721	0,544	0,540
525–535	0,718	0,708	0,532	0,531
535–545	0,708	0,696	0,535	0,520
545–555	0,694	0,690	0,527	0,521
555–565	0,685	0,677	0,526	0,517
565–575	0,678	0,674	0,536	0,525
575–585	0,684	0,674	0,550	0,538
585–595	0,715	0,706	0,587	0,580
595–600	0,812	0,807	0,701	0,699
Среднее значение	0,719	0,720	0,556	0,554

ЛИТЕРАТУРА

1. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
2. А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина, Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов: а. с. № 2738 от 27.12.16 Республика Казахстан.
3. В.А. Витюк, А.Д. Вурим, В.М. Котов, А.В. Пахниц, Определение параметров испытаний ТВС в импульсном графитовом реакторе // журнал «Атомная энергия», Т. 120, Вып. 1, май 2016 г.
4. Л.К. Жагипарова, В.М. Котов, Расчетное исследование нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства // журнал «Вестник» НЯЦ РК, Вып. 3 (75), сентябрь 2018 г.
5. Л.К. Жагипарова, Р.А. Иркимбеков, Определение распределения энерговыделения в канале ID3 реактора ИГР // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии: доклады международной конференции-конкурса молодых ученых и специалистов. Алматы, 06-08 июня 2012 г. – Алматы, 2012. – С. 179–189.
6. Иркимбеков Р. А., Энерговыделение в модельной ТВС при тепловых испытаниях в импульсной реакторной установке: дис. канд. физ.-мат. наук.: 01.04.14 // НИ ТПУ. – Томск, 2016, – 129 с.

МОДЕЛДІ ЖШЖ ЭКСПЕРИМЕНТТЕРДІ ЖҮРГІЗУ КЕЗІНДЕ ИГР ЖҰМЫСТАРЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ТАҢДАУ

З.Б. Кожабаев, Л.К. Жагипарова, Р.А. Иркимбеков

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада жылутасымалдаудың шектеулі саны бар ауданына – натрий балқымасы – және балқымадағы қалдықты энергия бөлінудің бар болуы кезінде оны салқындата отырып белсенді аймақ материалдарының балқымасының жылжу үдірістерін зерттеуге арналған эксперименталдық құрылғының нейтронды-физикалық есептерінің нәтижесі берілген. Моделді жылутасымалдағыш жинақтың биіктігі бойынша энергия бөлінудің таралуының есептік мағынасы алынды. Отында және эксперименталдық құрылғының конструкциялық материалдарының дағы энергия бөлінудің реактордың белсенді аймағындағы энергия бөлінуге қатысты көлеміне баға берілді.

Для определения удельного энерговыделения топлива экспериментального устройства с учетом увеличения температуры кладки реактора и изменения конфигурации конструктивных элементов и топлива в процессе реализации запланированного эксперимента, был проведен анализ полученных результатов расчетов и построена диаграмма изменения мощности ТВС, показанная на рисунке 4 красной линией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы:

- проведены нейтронно-физические расчеты с учетом разогрева графитовой кладки реактора ИГР, радиационного разогрева конструкционных материалов и соответствующего положения регулирующих стержней;
- определено распределение энерговыделения в топливе и конструкционных материалах по высоте экспериментального устройства для его исходной конфигурации и различной температурой кладки реактора ИГР;
- с учетом плавления топлива и конструкционных материалов в чехле ТВС и дальнейшего перемещения расплава топлива и конструкционных материалов в процессе моделирования эксперимента определена диаграмма изменения мощности ТВС.

Работа выполнена в рамках бюджетной программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан», темы «Исследования процессов, происходящих при тяжелой аварии в активной зоне реактора на быстрых нейтронах».

SELECTION OF IGR OPERATION PARAMETERS DURING EXPERIMENTS WITH MODEL FA

Z.B. Kozhabayev, L.K. Zhagiparova, R.A. Irkimbekov

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

The paper presents results of neutronic parameter calculations of experimental device intended for studying processes of core materials melt movement into the area with restricted amount of coolant – sodium melt – and its cooling with presence of residual energy release in the melt. Calculated values of energy release distribution along the height of model fuel assembly have been obtained. The value of ratio of energy release in melt and structural materials of the experimental device to the energy release in the reactor core have been estimated.