

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ЖАРОПРОЧНОГО ЗАЩИТНОГО КОЖУХА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Кожабаяев З.Б., Иркимбеков Р.А.

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

Статья посвящена повышению безопасности экспериментов, проводимых на КИР ИГР. Представлены результаты расчетов нейтронно-физических параметров экспериментальных устройств с жаропрочным кожухом. Использование кожуха предполагается для дополнительной защиты активной зоны реактора ИГР от возможного воздействия расплава материалов экспериментального устройства. В качестве материала защитного кожуха рассматривались вольфрам, тантал и углепластик. Применение защитного кожуха оценивалось по следующим параметрам: влияние на относительную мощность экспериментального устройства, влияние на распределение мощности в экспериментальном устройстве, температуры плавления и радиационный разогрев материала кожуха.

Ключевые слова: реактор ИГР, экспериментальное устройство, жаропрочный материал, защитный кожух, вольфрам, тантал, углепластик, температура плавления.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире ежегодно проводятся исследования, направленные на исключение аварийных ситуаций во время проведения экспериментов в реакторах. Исследования в рамках данной темы направлены на поиск эффективных способов предотвращения аварийных ситуаций или сведения их к минимуму.

Эксперименты с различными видами устройств, проводимые на реакторе ИГР, предполагают плавление твэлов при температуре 3200 К с образованием бассейна расплава топлива и стали в полости чехла ТВС. Для предотвращения аварийных случаев выхода расплава топлива из полости чехла ТВС и повреждения активной зоны реактора предполагается использование жаропрочного кожуха. Данный кожух обеспечит дополнительную защиту реактора и наружного корпуса экспериментального устройства (ЭУ) в условиях контактной термической нагрузки со стороны расплава топлива. Учитывая высокую стоимость жаропрочных материалов, необходимо наиболее оптимальное использование материалов чехла с точки зрения экономии средств. Замена поврежденных частей кожуха не представляется возможным в случае цельной конструкции чехла, поэтому предполагается использование составной конструкции кожуха. Количество используемых частей кожуха для проведения эксперимента подбирается в зависимости от размеров чехла ТВС и его высотного расположения относительно центра активной зоны (ЦАЗ) реактора ИГР. Также применение защитной оболочки в виде ампульного устройства увеличивает физический вес экспериментального устройства и ухудшает нейтронно-физические характеристики, что нецелесообразно с точки зрения исследовательских задач.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве жаропрочного материала для защитного кожуха были подобраны следующие материалы с высокой температурой плавления:

- вольфрам с температурой плавления 3695 К;

- тантал с температурой плавления 3290 К;

- углепластик с температурой плавления от 1800 до 3000 К.

Для сравнения использовались 2 модели ЭУ с разными видами материалов кожуха, представленные на рисунке 1 и расположенные в центральном экспериментальном канале (ЦЭК) реактора ИГР. Устройство № 1 (рисунок 1-а) имеет двухрядную компоновку, состоящую из 46 твэлов в чехле ТВС. Центр топливного столба смещен на 500 мм выше уровня ЦАЗ реактора ИГР.

В устройстве № 2 (рисунок 1-б) используется однорядная компоновка, состоящая из 24 твэлов. Центр топливного столба находится на уровне ЦАЗ реактора ИГР.

Основные характеристики твэлов для обоих ЭУ показаны в таблице 1.

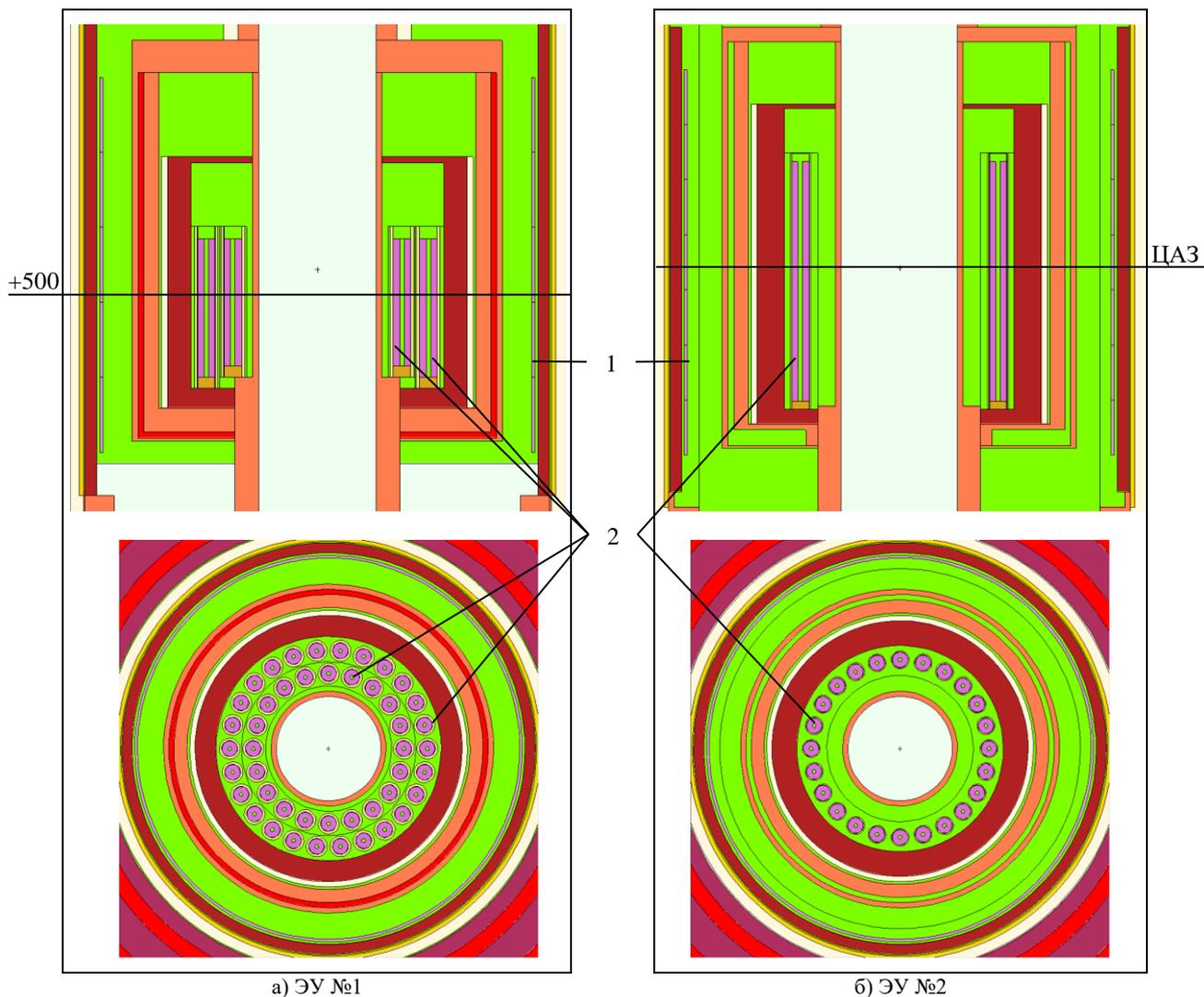
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

При проведении расчетов использовалась нейтронно-физическая модель реактора ИГР [1]. Расчеты выполнены с использованием расчетного кода MCNP5 [2]. Расчетная модель реактора полностью соответствует конструкции и учитывает неравномерность распределения концентрации урана в объеме активной зоны. Состояние реактора, близкое к критическому, достигается соответствующим положением регулирующих стержней. Отметка «0» соответствует нижнему торцу неподвижной зоны реактора [3]. Моделирование экспериментального устройства осуществлялось с соблюдением основных размерно-материальных характеристик [4].

В процессе проведения расчетов рассмотрены следующие конфигурации расчетных моделей:

- исходная конфигурация без использования защитного кожуха с температурой активной зоны реактора ИГР равной 294 К и 700 К для ЭУ;
- конфигурация ЭУ с добавлением вольфрамового защитного кожуха;
- конфигурация ЭУ с добавлением танталового защитного кожуха;

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ЖАРОПРОЧНОГО ЗАЩИТНОГО КОЖУХА
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**



а) ЭУ №1

б) ЭУ №2

1 – жаропрочный защитный кожух; 2 – твэлы экспериментальных устройств

Рисунок 1. Расчетные модели ЭУ

Таблица 1. Основные характеристики ЭУ

Наименование параметра	Значение	
	ЭУ №1	ЭУ №2
Топливо	диоксид урана	
Содержание ²³⁵ U в активной части, %	17	
Содержание ²³⁵ U в бланкетной части, %	0,27	
Плотность в активной части, кг/м ³	10300	9300
Плотность в бланкетной части, кг/м ³	10800	10300
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9	
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5	
Высота топливного столба, мм	195/200	450
Высота активной части топливного столба, мм	/175/185	435
Высота бланкетной части топливного столба, мм	15/15	15
Материал оболочки	12X18N10T	X16N15M3Б
Наружный диаметр оболочки, мм	6,9	
Внутренний диаметр оболочки, мм	6,1	
Масса топливных таблеток ТВС, кг	2,702	2,850
Масса активной части топливных столбов, кг	2,479	2,750
Масса бланкетной части топливных столбов, кг	0,223	0,100

– конфигурация ЭУ с добавлением углепластикового защитного кожуха.

Расчет высотного распределения энерговыделения в топливе ТВС проведен с разбиением на слои по 10 мм. Отношение удельного энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе вычислено по формуле [5]:

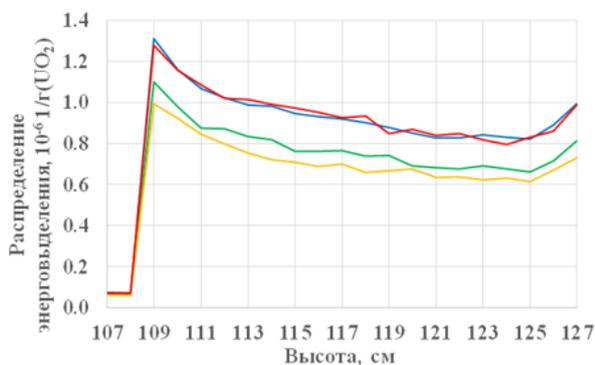
$$k = \frac{q}{Q} \cdot \frac{1}{m},$$

где q – энерговыделение в топливе, о.е.; Q – энерговыделение в реакторе ИГР, о.е.; m – масса топлива, г.

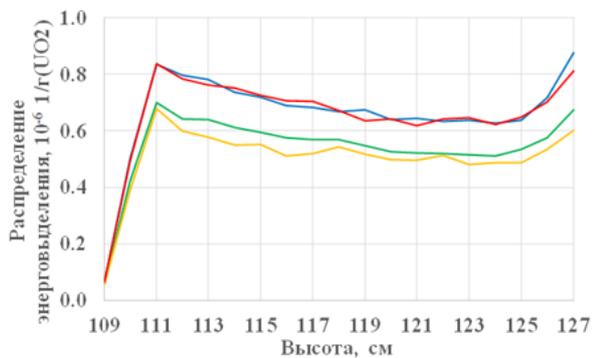
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В результате проведенных нейтронно-физических расчетов определено отношение удельного энерговыделения в топливе модельной ТВС к энерговыделению в реакторе.

На рисунке 2 представлены диаграммы изменения отношения энерговыделения в топливе чехла ТВС ЭУ № 1 к энерговыделению в реакторе ИГР по высоте топливного столба для наружного и внутреннего рядов твэлов. Как видно из диаграммы, наиболее подходящим материалом, с точки зрения сохранения удельной мощности в экспериментальном устройстве, является углепластик, так как падение удельной мощности в топливе ЭУ составило примерно 7%. При использовании вольфрама это значение составило 23%, а при использовании тантала 31%.



а) внешний ряд

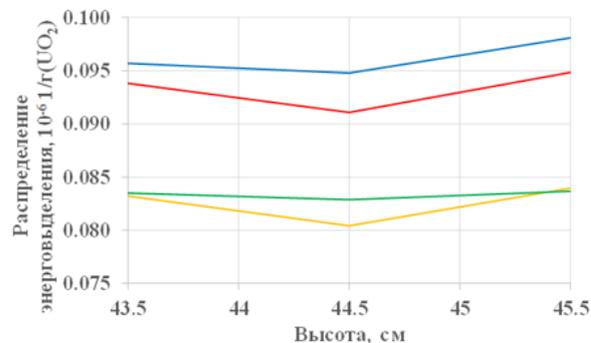


б) внутренний ряд

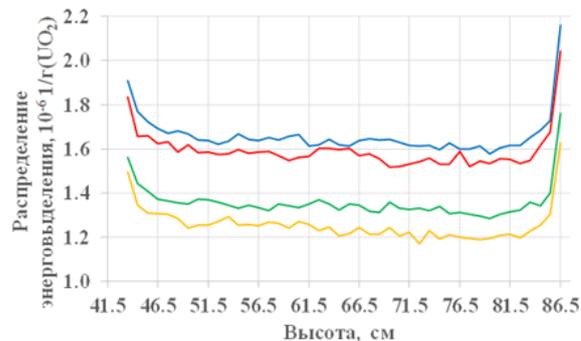
— без кожуха — вольфрам — тантал — углепластик

Рисунок 2. Диаграмма распределения энерговыделения в чехле ТВС ЭУ №1

На рисунке 3 представлены распределения энерговыделения для бланкетной и активной частей чехла ТВС ЭУ №2. В данном случае падение удельной мощности при использовании углепластика составило 8%, вольфрама 20% и тантала 28%.



а) бланкетная часть



б) активная часть

— без кожуха — вольфрам — тантал — углепластик

Рисунок 3. Диаграмма распределения энерговыделения в чехле ТВС ЭУ №2

Средние значения полученных отношений удельного энерговыделения в топливе чехла ТВС к энерговыделению в ИГР для обеих ЭУ показаны в таблицах 2, 3. В таблице 4 представлены отношения удельного энерговыделения защитного кожуха к энерговыделению в реакторе для обеих ЭУ.

Таблица 2. Среднее значение отношения удельного энерговыделения в топливе чехла ТВС ЭУ №1 к энерговыделению в реакторе ИГР

Наименование	Отношение удельного энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-6} \text{ 1/г} \pm 0,001$			
	без защитного кожуха	вольфрам	тантал	углепластик
Внешний ряд	0,8627	0,7125	0,6562	0,8646
Внутренний ряд	0,6611	0,5423	0,5046	0,6564

Для сравнения используемых моделей на высоте от 99 до 104 см относительно нижнего торца неподвижной зоны реактора рассчитано отношение удельного энерговыделения в кожухе ЭУ к энерговыделению в ИГР и представлено в таблице 5.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ЖАРОПРОЧНОГО ЗАЩИТНОГО КОЖУХА
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Таблица 3. Среднее значение отношения удельного энерговыделения в топливе чехла ТВС ЭУ №2 к энерговыделению в реакторе ИГР

Наименование	Отношение удельного энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-6} 1/g \pm 0,001$			
	без защитного кожуха	вольфрам	тантал	углепластик
Бланкетная часть	0,0962	0,0833	0,0825	0,0932
Активная часть	1,6595	1,3563	1,2561	1,5922

Таблица 4. Отношение удельного энерговыделения в защитном кожухе ЭУ к энерговыделению в реакторе ИГР

Наименование	Отношение удельного энерговыделения в кожухе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-7} 1/g \pm 0,001$		
	вольфрам	тантал	углепластик
ЭУ №1	0,3409	0,3979	0,1722
ЭУ №2	0,3171	0,3730	0,1611

Таблица 5. Отношение удельного энерговыделения отдельного отрезка защитного кожуха ЭУ к энерговыделению в реакторе ИГР

Высота, см	Отношение удельного энерговыделения в кожухе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-7} 1/g \pm 0,001$					
	вольфрам		тантал		углепластик	
99	0,358	0,347	0,410	0,415	0,178	0,171
100	0,353	0,349	0,401	0,410	0,171	0,191
101	0,327	0,338	0,407	0,412	0,171	0,181
102	0,328	0,371	0,404	0,403	0,168	0,171
103	0,316	0,340	0,363	0,408	0,174	0,174
104	0,340	0,369	0,377	0,417	0,176	0,169

По полученным данным отношения энерговыделения в адиабатическом приближении рассчитаны значения температуры материалов кожуха ЭУ в предположении, что интегральная мощность ИГР со-

ЛИТЕРАТУРА

1. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов: а. с. № 2738 от 27.12.16 Республика Казахстан / А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина.
2. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
3. Расчетное исследование нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства / Л.К. Жагипарова, В.М. Котов, // журнал «Вестник» НЯЦ РК, Вып. 3 (75), сентябрь 2018 г.
4. Энерговыделение в модельной ТВС при тепловых испытаниях в импульсной реакторной установке: дис. канд. физ-мат. наук.: 01.04.14 / Р. А. Иркимбеков // НИ ТПУ. – Томск, 2016, – 129 с.
5. Определение распределения энерговыделения в канале ID3 реактора ИГР / Л.К. Жагипарова, Р.А. Иркимбеков // 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.

ставила 5200 МДж:

- при использовании вольфрама в ЭУ №1 до 1700 К, в ЭУ №2 до 2000 К;
- при использовании тантала в ЭУ №1 до 1704 К, в ЭУ №2 до 2091 К;
- при использовании углепластика в ЭУ №1 до 427 К, в ЭУ №2 до 481 К.

Выводы

Для защиты наружного корпуса ЭУ и кладки реактора ИГР от воздействия расплавов, образующихся при возможном возникновении аварийных ситуаций, была предложена установка дополнительного кожуха.

На основании проведенных нейтронно-физических расчетов по исследованию влияния используемого материала для кожуха на характеристики экспериментального устройства следует:

1. При применении вольфрама снижается мощность испытываемого устройства, но из-за высокой температуры плавления, равной 3695 К, вольфрам выдерживает большую термическую нагрузку относительно других приведенных материалов кожуха. Примечательно, что это значительно превышает температуру расплава диоксида урана (3200 К). Кроме этого, вольфрам подвержен радиационному разогреву и поэтому не может быть использован в контакте со стальными материалами.

2. В отличие от вольфрама, тантал имеет менее высокую температуру плавления (3290 К), но выбран из-за его устойчивости к различным типам химических воздействий. Тантал произвел самое негативное влияние на мощность ЭУ.

3. Использование углепластика в качестве защитного кожуха незначительно уменьшает мощность ЭУ. Однако углепластик имеет температуру плавления от 1800 до 3000 К в зависимости от своего состава и технологии изготовления, а при высоком градиенте температуры становится хрупким.

**RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF INSTALLING A HEAT-RESISTANT PROTECTIVE SHELL
AGAINST THE EXPOSURE OF MELTS DURING IN-REACTOR EXPERIMENTS**

Z.B. Kozhabayev, R.A. Irkimbekov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The article is devoted to improving the safety of experiments carried out at the IGR reactor. The results of calculations of the neutron-physical parameters of experimental devices with a heat-resistant jacket are presented. The use of the casing is intended for additional protection of the IGR reactor core from the possible impact of the melt of the materials of the experimental device. Tungsten, tantalum and carbon fiber reinforced plastic were considered as the material of the protective cover. The use of a protective casing was evaluated according to the following parameters: the effect on the relative power of the experimental device, the effect on the power distribution in the experimental device, the melting temperature and radiation heating of the casing material.

Keywords: IGR reactor, experimental device, heat-resistant, protective casing, tungsten, tantalum, carbon fiber, melting point.

**РЕАКТОРЛЫҚ ТӘЖІРИБЕ ЖАСАҒАНДА ЕРТІПТЕРДІҢ АШУЫНА ҚАРСЫ ЖЫЛЫҚТЫҚ
ТӨЗІМДІ ҚОРҒАУШЫ ҚАПТАМА ОРНАТУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ**

З.Б. Кожабаяев, Р.А. Иркимбеков

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

Мақала ИГР реакторында жүргізілген эксперименттердің қауіпсіздігін арттыруға арналған. Тәжірибелік құрылғылардың ыстыққа төзімді қаптама бар нейтронды-физикалық параметрлерін есептеу нәтижелері келтірілген. Қаптаманы пайдалану ИГР реакторының өзегін эксперименттік құрылғы материалдарының балқымасының ықтимал әсерінен қорғауға арналған. Вольфрам, тантал және көміртекті талшықтан жасалған арматураланған пластмасса қорғаныс қабаты үшін материалдар ретінде қарастырылды. Қорғаныс қаптамасын пайдалану келесі параметрлер бойынша бағаланды: эксперименттік құрылғының салыстырмалы қуатына әсері, эксперименттік құрылғыдағы қуаттың таралуына, балқу температурасына және корпус материалының радиациялық қызуына.

Түйінді сөздер: ИГР реакторы, тәжірибелік құрылғы, ыстыққа төзімді, қорғаныс қаптама, вольфрам, тантал, көміртекті талшық, балқу температурасы.