

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-56-62>
УДК 621.039.3

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНЫХ АМПУЛ НА ПАРАМЕТРЫ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТОПЛИВА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РЕАКТОРЕ ИГР

Г.Г. Какимова*, О.М. Жанболатов, Р.А. Иркимбеков, А.С. Сураев, Н.Е. Мухамедов

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

** E-mail для контактов: kakimova@nnc.kz*

В данной работе проведен анализ влияния материала защитной ампулы на нейтронно-физические характеристики гамма-нейтронного облучения экспериментальных образцов топлива при испытаниях на исследовательском реакторе ИГР. Расчеты выполнены с использованием кода MCNP6 [1] и библиотек ENDF/B-VII [2]. Рассмотрены конструкционные материалы защитной ампулы, применяемые при испытаниях экспериментальных тепловыделяющих сборок. Определены зависимости энерговыделения, спектральных характеристик нейтронного поля и пространственного распределения потока нейтронов от состава и толщины стенок защитной ампулы. Установлено, что выбор материала ампулы оказывает количественно измеримое влияние на условия облучения топливных элементов, которое необходимо учитывать при интерпретации результатов реакторных испытаний. Полученные результаты формируют основу для обоснования конструктивных решений и оптимизации условий облучения топливных элементов.

Ключевые слова: защитная ампула, топливные элементы, нейтронно-физические характеристики, энерговыделение, исследовательский реактор ИГР.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследовательские ядерные реакторы широко используются для проведения экспериментальных исследований, направленных на изучение нейтронно-физических и тепловых процессов в ядерном топливе и конструкционных материалах. Одним из основных направлений таких исследований является облучение топливных элементов в специально разработанных защитных ампулах, размещаемых в активной зоне реактора. Результаты подобных экспериментов используются при обосновании проектных решений, повышении уровня безопасности и оптимизации характеристик топлива энергетических ядерных реакторов.

Материалы и конструкция защитной ампулы определяют характер взаимодействия нейтронного потока с веществом, что оказывает влияние на формирование спектра нейтронов, пространственное распределение плотности нейтронного потока и энерговыделение в топливных твэлах. В ряде случаев материал защитной ампулы может оказывать существенное влияние на экспериментальные параметры, что необходимо учитывать при интерпретации результатов облучательных экспериментов.

В испытаниях используются ампулы типов ID-M и WF. Ампула ID-M выполняет функции герметичного силового корпуса экспериментального устройства, обеспечивая локализацию внутренних элементов, их охлаждение и защиту реакторной установки. Ампула WF применяется для методических и физических

исследований с модельной ТВС и предназначена для изучения распределения энерговыделения и теплового состояния элементов экспериментального устройства в условиях реакторных экспериментов.

Особый интерес представляет анализ влияния конструкционных материалов с различными нейтронно-физическими свойствами, таких как сталь и цирконий, применяемых в одно- и двустенных защитных ампулах. Стальные ампулы характеризуются относительно высоким сечением захвата нейтронов и способны оказывать экранирующее воздействие на нейтронный поток, тогда как циркониевые сплавы обладают более благоприятными нейтронно-физическими свойствами и широко применяются в ядерной энергетике. Сравнительный анализ указанных вариантов ампул позволяет оценить степень их влияния на параметры облучения твэлов.

Актуальность подобных исследований возрастает при моделировании облучения твэлов перспективных энергетических реакторов в условиях исследовательского реактора ИГР [3], поскольку различия в спектральных характеристиках и геометрии активной зоны могут усиливать влияние конструкционных элементов облучательного устройства на параметры испытаний. В этой связи требуется проведение детального анализа влияния материалов и конструкции защитной ампулы на параметры облучения твэлов с использованием современных методов численного моделирования.

Целью работы является исследование влияния материала и конструкции защитной ампулы на параметры облучения и, в первую очередь, на распределение энерговыделения в топливных ТВЭлах.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: разработка нейтронно-физической расчетной модели с учетом конструктивных особенностей защитных ампул; проведение нейтронно-физических расчетов для различных вариантов материала защитной ампулы; в том числе при различных состояниях активной зоны при различной температуре графитовой кладки реактора и положении стержней регулирования; сравнительная оценка энерговыделения в ТВЭлах при использовании защитных ампул двух типов при различных динамических испытаниях.

Научная новизна работы заключается в комплексной оценке влияния материала и конструктивного исполнения защитных ампул (одностенных и двухстенных) на параметры облучения ТВЭлов в условиях исследовательского реактора ИГР. Впервые для рассматриваемой конфигурации выполнено сопоставление стальных и циркониевых ампул с учетом их влияния на распределение энерговыделения, коэффициент размножения нейтронов и параметры реактивности при различных режимах работы активной зоны.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при выборе материала и конструкции защитных ампул для внутриреакторных испытаний топливных элементов. Результаты исследования могут быть применены при проектировании экспериментальных устройств, интерпретации результатов облучательных экспериментов, а также при обосновании условий испытаний перспективного ядерного топлива энергетического реактора.

Результаты работы могут быть использованы при выборе материалов защитных ампул и обосновании конструктивных решений при их проектировании.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является экспериментальное устройство, топливом которого являются ТВЭлы энергетического реактора, размещенные в защитных ампулах. Модель активной зоны с размещенными ТВЭлами была построена в программном комплексе MCNP6.

Объект облучения представляет собой квадратную ТВС, окруженную стальной оболочкой. Топливом являются ТВЭлы энергетического реактора. ТВЭл состоит из герметичной оболочки, внутри которой размещается топливо и локализуются продукты деления. В ТВЭл помещены цилиндрические таблетки из диоксида урана с плотностью $10,31 \text{ г/см}^3$, каждая с внешним

радиусом 4,10 мм, формирующие топливный столб высотой 800 мм. Оболочка ТВЭла с радиусом 4,75 мм и высотой 800 мм выполнена из циркониевого сплава. Между топливным материалом и циркониевым сплавом имеется газовый зазор.

Ловушка представляет собой стакан из стали 12X18H10T с внешним радиусом 79 мм и высотой 905 мм. Корпус представляет собой двухслойную сварную конструкцию: наружный корпус – из цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем, внутренний – из обечайки со сферическим днищем, с зазором между ними для тракта охлаждения азотом. Корпуса выполнены из легированных сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ, а внутренние охлаждающие трубки – из нержавеющей стали 12X18H10T. Основные габариты: наружный диаметр обечайки 219 мм, внутренний – 195 мм; внутренний диаметр страховочного корпуса – 171 мм при длине около 3962 мм. На рисунке 1 представлена схема расположения ТВЭлов (1-9) в ТВС (3×3).

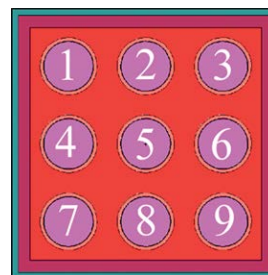


Рисунок 1. Схема расположения ТВЭлов (1-9) в ТВС (3×3)

На рисунке 2 представлено поперечное сечение расчетной модели тепловыделяющей сборки, размещенной в реакторе ИГР.

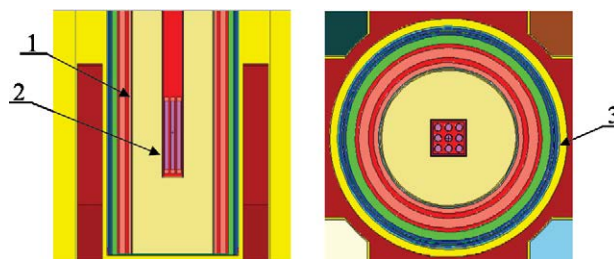


Рисунок 2. поперечное сечение расчетной модели тепловыделяющей сборки, размещенной в реакторе ИГР
1 – ловушка, 2 – ТВС, 3 – НА-228

Ампулы ID-M и WF конструктивно включают в себя корпус с днищем и крышкой, образующие замкнутый объем для локализации тепловых и радиационных воздействий, возникающих в процессе эксперимента.

На рисунках 3 и 4 представлены ампулы ID-M и WF [4].

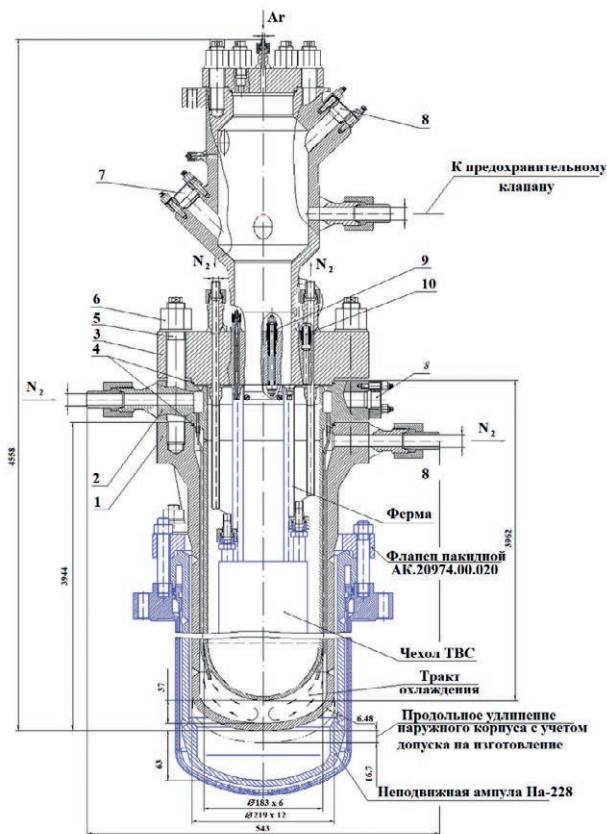


Рисунок 3. Ампула ID-M

1 – корпус наружный; 2 – корпус внутренний; 3 – крышка ID-M; 4 – прокладка 212×202×2; 5 – шпилька M27×2; 6 – гайка M27×2; 7 – заглушка Ду28; 8 – заглушка Ду24; 9 – токоввод; 10 – имитатор

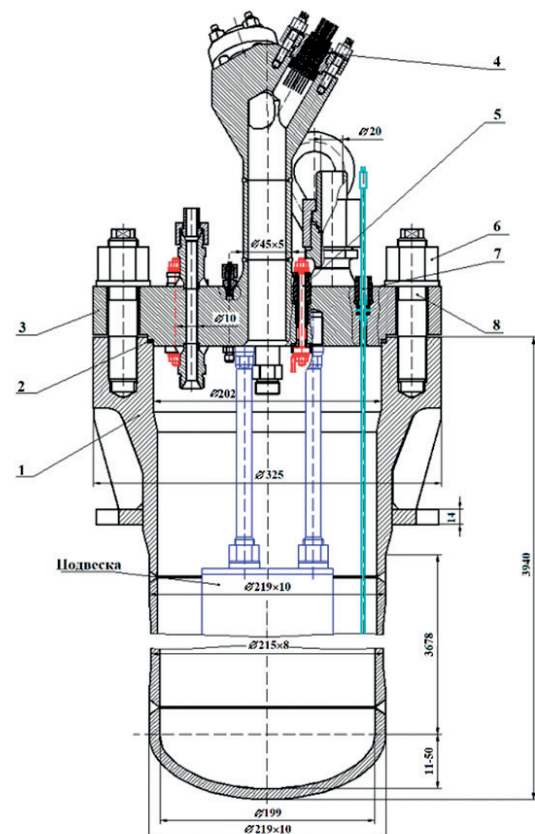


Рисунок 4. Ампула WF

1 – корпус, 2 – прокладка, 3 – крышка, 4 – гермопроходник, 5 – токоввод, 6 – гайка M30×2 ГОСТ 15523-70, 7 – датчик нейтронного потока, 8 – шпилька M30×2

В расчетных исследованиях рассматриваются два варианта исполнения ампул, отличающихся материалом корпуса: из нержавеющей стали и из циркониевого сплава (99% циркония и 1% ниобия). Ампула из стали характеризуется высокой прочностью и устойчивостью к механическим и термическим нагрузкам, тогда как ампула из циркониевого сплава обладает пониженным поглощением нейтронов и меньшим влиянием на нейтронно-физические характеристики активной зоны. При замене стальной ампулы на циркониевую размеры всех элементов конструкции не меняются.

Использование ампул из различных материалов позволяет оценить влияние конструкционного материала силового корпуса на тепловые и нейтронно-физические параметры экспериментального устройства в условиях реакторных испытаний.

Метод исследования

Исследование проводилось с целью оценки влияния материала защитной ампулы на нейтронно-физические характеристики топливных элементов, испытываемых в исследовательском реакторе. Иссле-

дование проводилось для холодного и горячего состояний активной зоны, характеризующихся разогревом активной зоны и выводением стержней регулирования до полного извлечения из активной зоны. Расчетная методика для исследования экспериментального устройства при различных состояниях реактора представлена в [5].

В результате проведенных расчетов определяют отношение энерговыделения в твэле к энерговыделению в реакторе ИГР по формуле:

$$k = \frac{q}{Q} \cdot \frac{1}{m} \quad (1)$$

где q – энерговыделение в топливном твэле, о.е.;
 Q – энерговыделение в реакторе ИГР, о.е.;
 m – масса ампулы, г.

Для оценки теплового состояния ампул при интегральной мощности 5200 МДж выполнен расчет адiabатического нагрева по формуле [6]:

$$\Delta T = \frac{k}{c} \cdot 5200 \cdot 10^6 \quad (2)$$

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНЫХ АМПУЛ НА ПАРАМЕТРЫ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТОПЛИВА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РЕАКТОРЕ ИГР

Результаты анализировались в отношении распределения энерговыделения по высоте твэла и изменения нейтронно-физической характеристик в зависимости от материала ампулы.

В расчетах были использованы следующие параметры: общее количество нейтронов (историй), запускаемых в одном цикле – 1 000 000; начальное значение коэффициента размножения нейтронов – 1,00; количество начальных циклов, которые пропускаются до начала активного расчета – 20, общее количество циклов в расчете – 200.

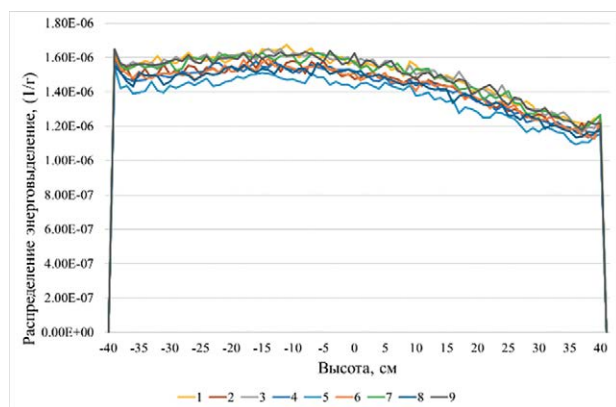
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для предварительного анализа проведен сравнительный расчет энерговыделения в ТВС экспериментального устройства в вариантах с одностенной и двустенной ампулами. Рассматривались два варианта материала оболочки каждой ампулы: нержавеющая сталь и циркониевый сплав. Расчеты проводились при одинаковых нейтронно-физических условиях, соответствующих номинальному режиму работы реакто-

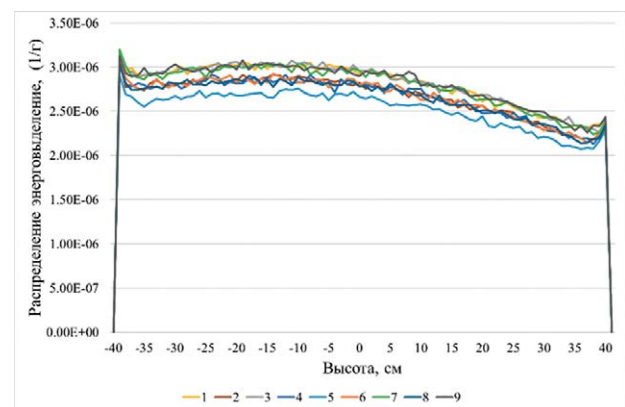
ра, что обеспечивало корректное сравнение влияния материала ампулы на распределение энерговыделения.

Расчеты проводились для холодного состояния реактора. Холодное состояние реактора – режим эксплуатации ядерного реактора, при котором температура активной зоны составляет 20 °С. Погрешность расчета энерговыделения составила 1%.

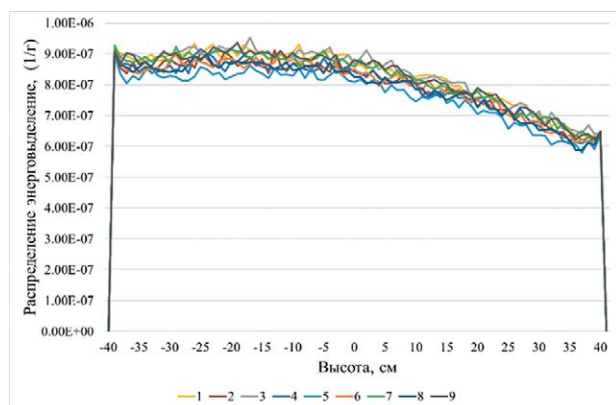
На рисунке 5 представлены распределения энерговыделения в расчетной модели для двух вариантов конструкции ампулы – со стальной и с циркониевой оболочкой, полученные с использованием детекторов WF и ID-M. Показано влияние материала ампулы на уровень и форму распределения энерговыделения по высоте твэлов. В целом характер распределений сохраняется, однако применение циркониевой ампулы приводит к более высоким значениям энерговыделения по сравнению со стальной. Установлено, что замена стальной ампулы на циркониевую приводит к увеличению энерговыделения WF в 1,9 раза, а ID-M – в 3,3 раза.



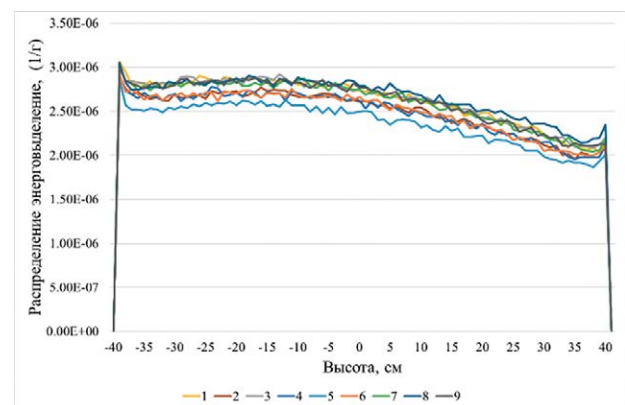
а) стальная (WF)



б) циркониевая (WF)



в) стальная (ID-M)



г) циркониевая (ID-M)

Рисунок 5. Распределение энерговыделения в расчетной модели: со стальной (а, в) и с циркониевой (б, г) ампулой

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНЫХ АМПУЛ НА ПАРАМЕТРЫ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ТОПЛИВА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РЕАКТОРЕ ИГР

Проведены расчеты физического веса для ампул WF и ID-M из стали и циркония при наличии и отсутствии устройства, результаты которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета реактивности для различных материалов ампул при наличии и отсутствии устройства.

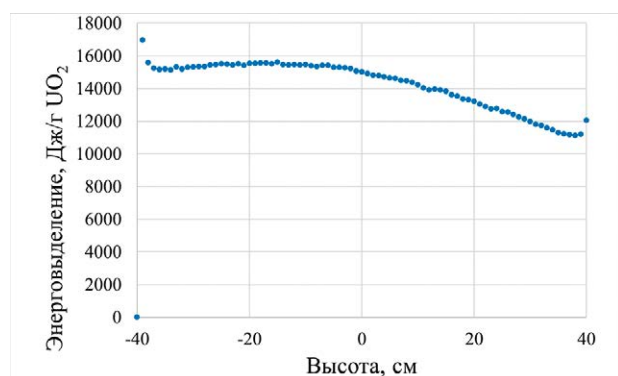
Вид и материал ампулы		С обл. устройством	Без обл. устройства	Физический вес обл. устройства, β
		$p1, \beta$	$p2, \beta$	
Одностенная	Сталь	1,13	7,97	6,84
	Цирконий	2,24	4,07	1,83
Двустенная	Сталь	1,34	9,91	8,57
	Цирконий	1,96	4,07	2,11

Проведены расчеты температуры циркониевой ампулы при полной интегральной мощности 5200 МДж в реакторе. Одностенная ампула из циркония нагревается до 178 °С, двустенная ампула из циркония 133 °С. Согласно техническим критериям эксплуатации стальных ампул, температура корпуса ампулы

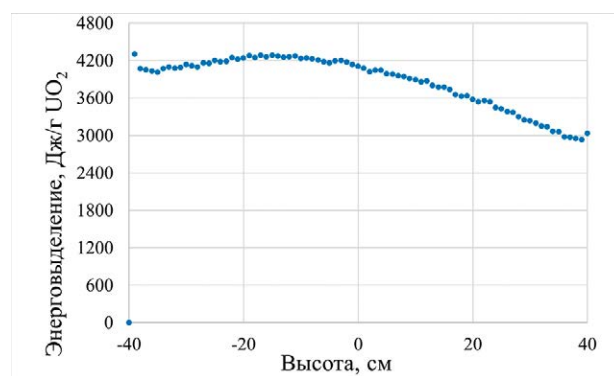
не должна превышать 350 °С. Как это видно из результатов расчетов, температура ампул из циркония не выходит за границу предела безопасной эксплуатации.

РАСЧЕТ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ГОРЯЧЕМ СОСТОЯНИИ РЕАКТОРА

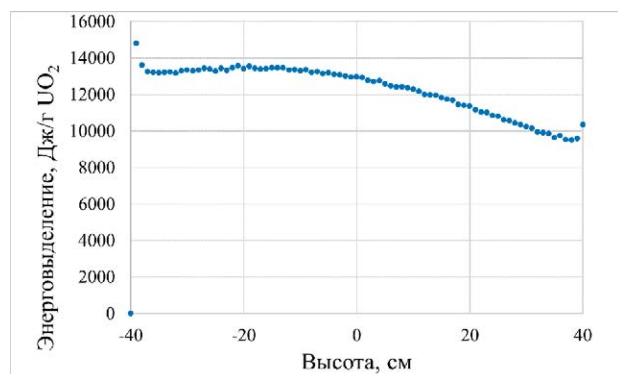
Проведены расчеты энерговыделения в топливе экспериментального устройства в вариативных состояниях реактора, различающихся тепловым полем активной зоны реактора и положением стержней регулирования. Для расчета состояний использовался шаг по энерговыделению в 500 МДж. В случае одностенной стальной ампулы удастся реализовать максимально возможное энерговыделение в реакторе 5200 МДж. Поскольку физический вес двустенной стальной ампулы больше, чем одностенной, в реакторе возможно реализовать только 4300 МДж. Расчеты энерговыделения в двустенной и одностенной ампулах из циркония проводились для тех же значений энерговыделения. При использовании ампул из циркония может быть реализовано большее интегральное энерговыделение в реакторе, поскольку остается значительный свободный ход стержней регулирования (запас реактивности). Однако существующие эксплуатационные ограничения по температуре активной зоны (1400 К) не допускают этого.



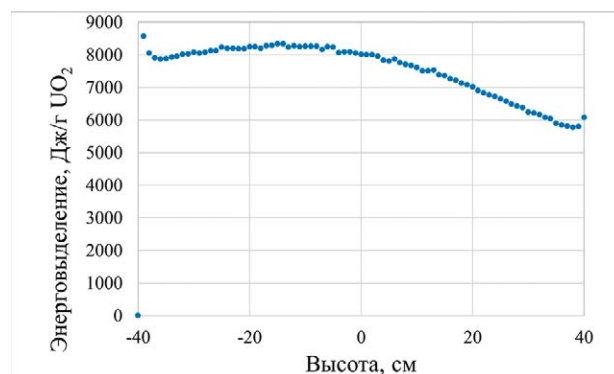
а) стальная (WF)



б) циркониевая (WF)



в) стальная (ID-M)



г) циркониевая (ID-M)

Рисунок 6. Распределение энерговыделения по высоте топлива в расчетной модели: со стальной (а, в) и с циркониевой (б, г) ампулой

На рисунке 6 представлены распределения энерговыделения по высоте твэла в расчетной модели типа ампул WF и ID-M из стали и циркония.

Анализ представленных зависимостей показывает, что энерговыделение распределено неравномерно по высоте твэла: максимальные значения приходятся на центральную область, тогда как в направлении к торцам наблюдается их снижение, что связано с аксиальным распределением нейтронного потока в реакторе.

Сопоставление результатов показывает, что в случае циркониевой ампулы уровень энерговыделения выше по всей длине твэла по сравнению со стальной ампулой, что обусловлено меньшим поглощением нейтронов. При этом для циркониевой ампулы характерно более равномерное распределение энерговыделения, тогда как для стальной ампулы наблюдается более выраженное снижение энерговыделения в верхней части твэла.

Обсуждение

Циркониевые сплавы применяются в атомной промышленности довольно продолжительное время и хорошо зарекомендовали себя в качестве конструкционных материалов ТВС реакторов, поскольку имеют низкое сечение поглощения тепловых нейтронов, удовлетворительную механическую прочность, высокую коррозионную и радиационную стойкость.

Результаты расчетов показывают, что применение циркониевого сплава в качестве материала для защитной ампулы позволяет увеличить флюенс нейтронов на экспериментальных сборках. Это, в свою очередь, позволяет расширить экспериментальные возможности реактора ИГР для исследований топлива действующих и перспективных энергетических реакторов.

Однако использование циркониевого сплава может иметь определенные недостатки по сравнению с нержавеющей сталью. В первую очередь, должна приниматься во внимание высокая стоимость циркониевых ампул, обусловленная большими затратами при производстве циркония, в которые входит очистка руды циркония от примесей, поглощающих тепловые нейтроны. Также материал требует определенных условий для сварки и обработки, что, с учетом большого количества сварных швов и мелких деталей, значительно усложняет изготовление ампул.

Выводы

Разработана нейтронно-физическая модель облучательного устройства с использованием кода MCNP6. Проведены расчеты энерговыделения в твэ-

лах перспективного энергетического реактора с учетом влияния материала защитной ампулы на характеристики облучения.

Показано, что применение циркониевой ампулы приводит к увеличению уровня энерговыделения в твэлах по сравнению со стальной ампулой, при сохранении общего характера распределения по высоте.

Установлено, что материал ампулы оказывает существенное влияние на физический вес. При этом стальные ампулы в большей степени влияют на нейтронно-физические характеристики вследствие более высокого сечения поглощения нейтронов.

В ходе анализа установлено, что температура нагрева одностенной и двустенной ампул из циркония не превышает эксплуатационных пределов.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе материала защитных ампул, а также при обосновании конструктивных решений и условий проведения внутриреакторных испытаний топливных элементов.

Работа была выполнена при поддержке Комитета науки МНВО РК в рамках грантового проекта «Расчетное обоснование режимов внутриреакторных испытаний перспективного ядерного топлива» (ИРН AP26199863).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. MCNP6 Monte Carlo N–Particle Transport Code System, MCNP6.1. LANL, 2013.
2. ENDF/B-VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. Nuclear Data Sheets (2006).
3. Импульсный графитовый реактор ИГР / И.В. Курчатов, С. М. Фейнберг, Н. А. Доллежалъ и др. // Атомная энергия / АН СССР. – 1964. – Т. 17. – Вып. 6. – С. 463-474.
4. Расчет активности стальной ампулы после реакторного облучения / Сураев А.С., Какимова Г.Г., Иркимбеков Р.А. // Вестник НЯЦ РК. - 2023. – Вып. 4. – С. 85-90.
5. Irkimbekov, R.A., Vityuk, V.A., Vityuk, G.A., Zhanbolatov, O.M., Surayev, A.S., Popov, Y.A., & Kotlyar, A.N. (2025). Development of a new computational support tool for experiments in the impulse graphite reactor. Nuclear Engineering and Design, 443, 114278. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114278>.
6. Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика / И. В. Савельев. – 3-е изд., испр. – Москва: АСТ: Астрель, 2007. – 208 с. – ISBN 978-5-17-045411-0.

ИГР РЕАКТОРЫНДА СЫНАҚ ЖҮРГІЗУ КЕЗІНДЕ СӘУЛЕЛЕНДІРУ ҚҰРЫЛҒЫСЫ
ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ НЕЙТРОН-ФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА ҚОРҒАНЫШ АМПУЛА
МАТЕРИАЛЫНЫҢ ӘСЕРІ

Г. Г. Какимова*, О. М. Жанболатов, Р. А. Иркимбеков, А. С. Сураев, Н. Е. Мухамедов

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

** Байланыс үшін e-mail: kakimova@nnc.kz*

Осы жұмыста ИГР зерттеу реакторында сынақтар жүргізу кезінде қорғаныш ампула материалының сәулелендіру құрылғысы элементтерінің нейтрондық-физикалық сипаттамаларына әсеріне талдау жасалды. Есептеулер MCNP6 бағдарламалық коды және ENDF/B-VII деректер кітапханалары көмегімен орындалды. Эксперименттік жылу бөлуші құрамаларды сынау кезінде қолданылатын қорғаныш ампуланың конструкциялық материалдары қарастырылды. Қорғаныш ампуласы қабырғаларының құрамы мен қалыңдығына байланысты энергия бөлінуінің, нейтрон өрісінің спектрлік сипаттамаларының және нейтрон ағынының кеңістіктік таралуының тәуелділіктері анықталды. Ампула материалын таңдау отын элементтерін сәулелендіру жағдайларына сандық тұрғыдан өлшенетін әсер ететіні және бұл әсерді реакторлық сынақтардың нәтижелерін түсіндіру кезінде ескеру қажет екені анықталды. Алынған нәтижелер конструкциялық шешімдерді негіздеуге және отын элементтерін сәулелендіру жағдайларын оңтайландыруға арналған ғылыми негіз қалыптастырады.

Түйін сөздер: қорғаныш ампула, отын элементтері, нейтрон-физикалық сипаттамалар, энергия бөлінуі, ИГР зерттеу реакторы.

EFFECT OF PROTECTIVE CAPSULE MATERIAL ON THE NEUTRON-PHYSICAL
CHARACTERISTICS OF IRRADIATION DEVICE ELEMENTS DURING TESTING
AT THE IGR REACTOR

G. G. Kakimova*, O. M. Zhanbolatov, R. A. Irkimbekov, A. S. Surayev, N. E. Mukhamedov

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

** E-mail for contacts: kakimova@nnc.kz*

This study presents the analysis of the influence of the protective capsule material on the neutron-physical characteristics of fuel element irradiation during experiments conducted at the IGR research reactor. The calculations were performed using the MCNP6 code and the ENDF/B-VII nuclear data libraries. Different structural materials of protective capsules used in the testing of experimental fuel assemblies were considered. The dependences of energy deposition, spectral characteristics of the neutron field, and spatial distribution of neutron flux on the composition and wall thickness of the protective capsule were determined. It was found that the choice of capsule material has a quantitatively measurable effect on the irradiation conditions of the fuel elements, which must be taken into account when interpreting the results of reactor experiments. The obtained results provide a basis for substantiating design solutions and optimizing the irradiation conditions of fuel elements.

Keywords: protective capsule, fuel elements, neutron-physical characteristics, energy release, IGR research reactor.