

УДК 621.039.5

## РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТОРОМ НЕЙТРОНОВ

Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А., Мухамедов Н.Е.

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

В статье приведена методика расчета мощности элементов экспериментального устройства, основной целью которого является конвертация потока тепловых нейтронов ИГР. Данная методика является усовершенствованием различных расчетных способов получения данных по энерговыделению в конструктивных элементах испытываемых устройств на стадии планирования экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** ИГР, точечная кинетика, мощность реактора.

### ВВЕДЕНИЕ

Реактор ИГР [1] является исследовательским реактором с уникальными нейтронно-физическими характеристиками. Одним из направлений научных изысканий является моделирование различных аварийных ситуаций, способных произойти на реакторах и оценка возникающих повреждений. Для решения подобных вопросов необходимо проведение высокоточных экспериментальных исследований.

Одним из главных критериев эффективности эксперимента является знание динамики распределения энерговыделения в активной зоне самого реактора, в топливе и конструкционных материалах экспериментального устройства. Данная характеристика важна для определения допустимых границ, при которых обеспечивается безопасность хода эксперимента. Проблема с распределением мощности становится особенно актуальной в случае отсутствия или ограничения охлаждения различных испытываемых элементов.

Данная работа ставит целью получение достоверных расчетных данных по энерговыделению в топливе и конструкционных материалах в эксперименте с конвертором нейтронов ИГР [2–5]. Расчеты необхо-

димы для моделирования температурных полей в элементах, во избежание перегрева и расплавления, что может привести к нежелательным последствиям.

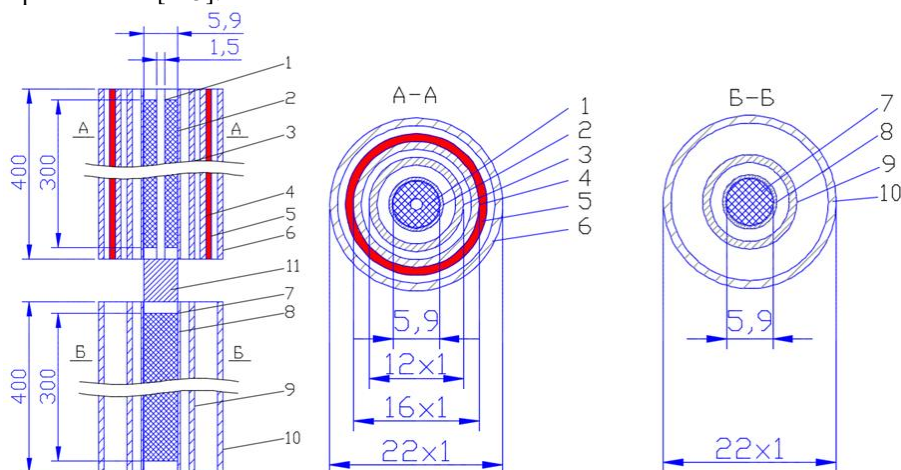
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

На рисунке 1 представлен эскиз испытательной секции экспериментального устройства.

Испытательная секция представляет собой сварную конструкцию и предназначена для размещения в ней двух твэлов, конвертора нейтронов и измерительного оборудования в процессе подготовки и проведения эксперимента.

В состав испытательной секции входят следующие элементы:

- верхний твэл с конвертором, с топливом массой ~ 80 г в виде диоксида урана и с обогащением по  $^{235}\text{U}$  равным 17 %;
- верхний твэл без конвертора, с топливом массой ~ 86 г в виде диоксида урана и с обогащением по  $^{235}\text{U}$  равным 0,27 %;
- соединительная штанга, соединяющая два твэла и задающая требуемое расстояние между ними;
- опорная штанга, обеспечивающая крепление твэлов к крышке ампулы.



1 – топливо 17%; 2 – оболочка верхнего твэла; 3 – рубашка охлаждения «верхнего» твэла; 4 – тепловой экран; 5 – кадмиевый поглотитель; 6 – корпус нижнего твэла; 7 – топливо 0,27%; 8 – оболочка нижнего твэла; 9 – рубашка охлаждения нижнего твэла; 10 – корпус нижнего твэла, 11 – талреп

Рисунок 1. Эскиз конструкции испытательной секции

Верхний твэл с конвертором содержит следующие элементы:

- оболочка, выполненная в виде трубки 6,9×0,4 мм с приварными нижними заглушками и крышками;

- внутренняя обечайка в виде трубки 12×1 мм, высотой 320 мм, образующая полость охлаждения твэла;

- тепловой экран, выполненный в виде трубки из стали марки 12Х18Н10Т, размером 16×1 мм, высотой 400 мм;

- кадмиевый поглотитель, выполненный в виде пластины, скрученной в трубку размером 18×1×400 мм, и закрепленный за тепловым экраном на уровне твэла;

- наружная обечайка в виде трубки 22×1 мм, высотой 400 мм, образующая полость охлаждения кадмиевого поглотителя;

Нижний твэл без конвертора содержит те же элементы, что и верхний твэл, за исключением теплового экрана и кадмиевого поглотителя.

Поглотитель нейтронов конвертора выполнен из природного кадмия. Низкая температура плавления кадмия потребовала введения тракта его охлаждения. Тракты теплоносителя тепловыделяющих сборок – отдельные, с идентичной геометрией по газовому потоку.

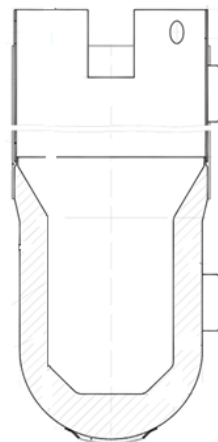
Твэлы обеих сборок набираются из топливных таблеток типа БН-350, высота топливного столба в обоих твэлах одинакова и равна 300 мм. Топливные таблетки из диоксида урана расположены в оболочке, которая представляет собой стальную трубку с размерами 6,9×0,4 мм. С торцов твэлы закрываются заглушками. Центр верхнего твэла находится на высоте +800 мм относительно центра активной зоны, середина нижнего твэла совпадает с центром активной зоны.

При этом у каждого твэла есть свои отличительные конструктивные особенности. Верхний твэл содержит топливные таблетки из диоксида урана массой около 80 г с обогащением 17 % по  $^{235}\text{U}$ , конвертер тепловых нейтронов в быстрые (кадмиевая трубка). Нижний твэл не содержит кадмиевого поглотителя и набирается из топливных таблеток из диоксида урана массой около 86 г с обогащением 0,27 % по  $^{235}\text{U}$ .

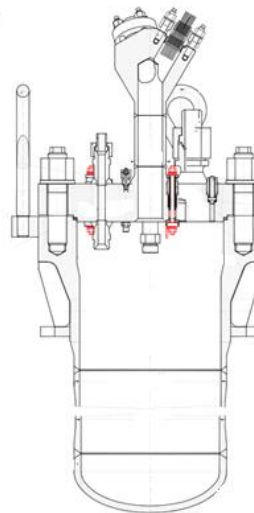
Испытательная секция помещается в защитный корпус с ловушкой расплава (рисунок 2-а). Ловушка представляет собой стальной стакан с наружным диаметром 158 мм и высотой 250 мм. К торцу стакана приварен стальной корпус. Корпус представляет собой обечайку с наружным диаметром 167 мм и толщиной 1,5 мм. Ловушка устанавливается внутрь защитной ампулы и предназначена для защиты стенок внутреннего корпуса ампулы от перегрева во время эксперимента.

Защитная ампула (рисунок 2-б) представляет собой сварную конструкцию из стали, состоящую из

цилиндрической обечайки, фланца и эллиптического днища. Основная задача ампулы – защита стенок ампулы реактора НА228 от высокотемпературного воздействия частей испытательного устройства.



а) схема ловушки расплава



б) схема защитной ампулы

Рисунок 2. Защитные чехлы экспериментального устройства с конвертором нейтронов

#### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ПРОГРАММЫ

Управление реактором при проведении эксперимента основано на знании зависимости мощности в исследуемом устройстве и в реакторе. Для определения энергетических параметров топлива и конструкционных материалов экспериментального устройства с учетом нагрева графитовой кладки реактора ИГР, был выполнен ряд нейтронно-физических расчетов с помощью программы MCNP5 [6] с библиотеками ядерных констант ENDF/B-VII. При проведении расчетов использовалась модель реактора ИГР [7], детально описывающая реальную конструкцию, и учитывающая неравномерность распределения концентрации урана в объеме активной зоны. Моделирование ЭУ осуществлялось с соблюдением основ-

ных размерно-материальных характеристик. Объединенная расчетная нейтронно-физическая модель экспериментального устройства с конвертером нейтронов и ИГР представлена на рисунке 3.

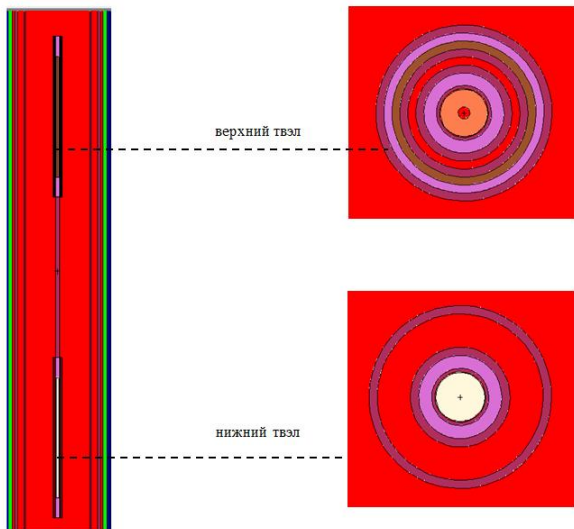


Рисунок 3. Модель испытательной секции экспериментального устройства для нейтронно-физического расчета

#### РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ИГР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПУСКА

Эксперимент с конвертером нейтронов ИГР имеет свои специализированные задачи. Для получения необходимых результатов исследования было решено выбрать режим работы «импульс» с максимальным интегральным энерговыделением 5,2 ГДж. Проведя предварительные расчеты в «холодном» состоянии кладки ИГР, была принята диаграмма реактора со стационарной мощностью 5,2 МВт (рисунок 4), позволяющая получить оптимальную диаграмму мощности в испытываемых твэлах, учитывая теплофизические характеристики.

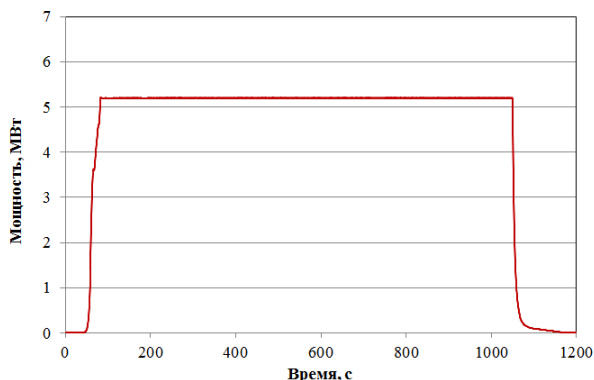


Рисунок 4. Планируемая диаграмма мощности реактора в эксперименте

Для нахождения диаграммы мощности топливных и конструктивных элементов необходимо использовать результаты расчетов нейтронно-физиче-

ских характеристик с помощью модели реактора. Установка экспериментального устройства в ЦЭК ИГР меняет полученные значения отношения мощности элемента к мощности реактора в результате изменения нейтронно-физических параметров реактора. Использование базы данных сечений и специального программного обеспечения для заданного температурного диапазона работы ИГР в эксперименте с целью расчета отношения энерговыделения элемента к энерговыделению реактора, позволяют точнее смоделировать поведение топливных сборок устройства в испытании.

Для сравнения расчетных характеристик применялись методики, характеризующиеся усложнением и учетом большего количества физических явлений, происходящих во время испытания. Более подробно особенности каждой методики описаны в [8]. Наиболее достоверная методика расчета диаграммы мощности элементов экспериментального устройства, учитывает изменение динамических нейтронно-физических параметров реактора ИГР и экспериментального устройства, изменяющихся от времени и температуры кладки активной зоны реактора ИГР. Система дифференциальных уравнений расчета мощности реактора ИГР и элемента экспериментального устройства имеет следующий вид:

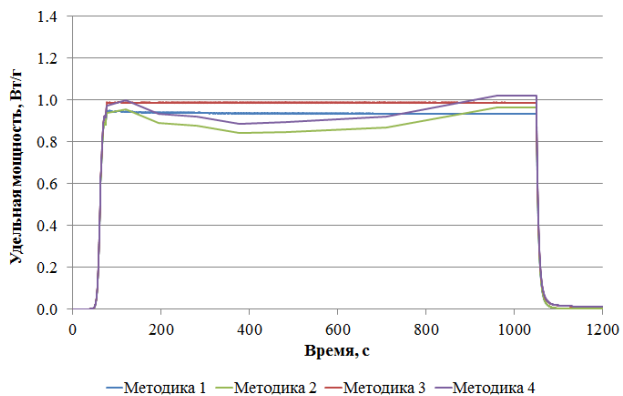
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t)-1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot c_i(t) + s \\ \frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t) \\ W_{\text{МГН}} = C_u \cdot \sigma_f \cdot E_f \cdot V_{\text{аз}} \cdot \varphi(t) \\ \frac{dC_{\gamma j}(t)}{dt} = YB_{\text{реакт}} \cdot W_{\text{МГН,реакт}} \cdot \beta_{\gamma j} - \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{общ}} = W_{\text{МГН}} + W_{\text{зап}} \\ W_{\text{зап}} = \sum_j \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{к.м.}} = K(T) * W_{\text{общ реактора}} \\ \frac{dC_{\gamma j}(t)}{dt} = YB_{\text{к.м.}}(T) \cdot W_{\text{к.м.}} \cdot \beta_{\gamma j} - \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{зап к.м.}} = \sum_j \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{общ к.м.}} = W_{\text{МГН к.м.}} + W_{\text{зап к.м.}} \end{array} \right. \quad (*)$$

где  $n$  – плотность нейтронов реактора;  $c_i$  – плотность ядер-предшественников;  $t$  – время;  $\rho(t)$  – реактивность;  $l$  – время жизни нейтронов;  $\lambda_i$  – постоянная распада ядер-предшественников;  $\beta_i$  – доля запаздывающих нейтронов;  $s$  – эффективная мощность источника;  $YB$  – доля запаздывающего энерговыделения в общей доле энерговыделения реактора;  $\lambda_{\gamma j}$  – константы распада -группы;  $\beta_{\gamma j}$  – доля запаздывающего энерговыделения  $j$ -группы;  $C_{\gamma j}(t)$  – концентрация источников запаздывающего излучения;  $K(T)$  – коэффициент отношения мощности элемента к мощности реактора, изменяющиеся от температуры активной зоны реактора ИГР;  $YB_{\text{к.м.}}(T)$  – доля запаздывающего энерговыделения в общей доле энерговыделения конструкционного материала, зависящая от температуры реактора.

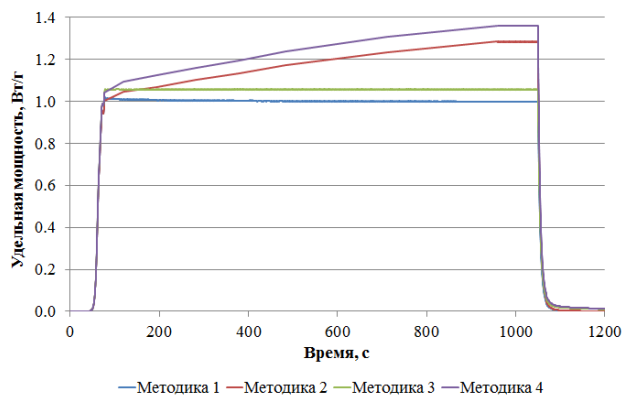
**РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА  
С КОНВЕРТОРОМ НЕЙТРОНОВ**

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТИ  
ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВА**

На рисунке 5 представлены результаты расчета мощности твэлов конвертора с помощью каждой методики.



а) верхний твэл



б) нижний твэл

Рисунок 5. Диаграмма мощности верхнего твэла

На рисунке видно, что применение методик, учитывающих изменение коэффициента отношения мощностей от температуры активной зоны, заметно меняет профиль диаграммы и интегральное энерговыделение. В таблице 1 представлены результаты расчета интегрального энерговыделения в топливных элементах экспериментального устройства. С применением расчетных методик 2 и 4 значение выделенной энергии увеличивается на 18%. Игнорирование данного обстоятельства может привести к расплавлению топлива и не способности получения уникальных данных по спектру нейтронов, учитывая предельный режим работы реактора в испытании.

Таблица 1. Сравнение значений энерговыделения твэлов по расчетным методикам

Номер методики	Интегральное удельное энерговыделение, Дж/г	
	верхний твэл	нижний твэл
1	930	995
2	889 (-5%)	1172 (+17,8%)
3	982 (+10,5%)	1051 (-10,3%)
4	939 (-4,3%)	1239 (+17,9%)

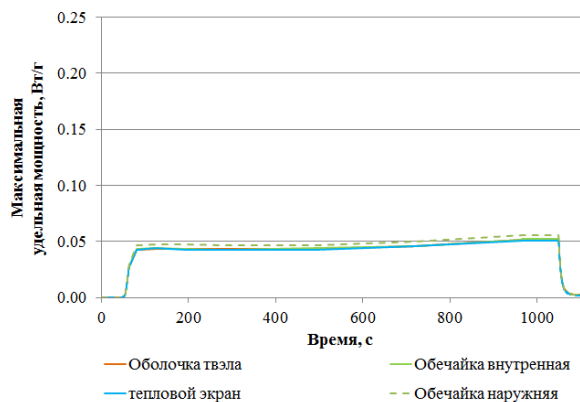
**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДИАГРАММЫ  
МОЩНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Энерговыделение в конструкционных материалах происходит в основном благодаря радиационному разогреву гамма излучений. В случае реактора в режиме «импульс» доля запаздывающей мощности составляет не более 10%, то в элементах конструкции конвертора доля может доходить до 26%. С помощью программы MCNP6, были рассчитаны доли запаздывающего энерговыделения во всех элементах испытательной секции (таблица 2). Результаты расчетов диаграмм мощности конструктивных элементов экспериментального устройства, с помощью описанной выше методики, представлены на рисунке 6.

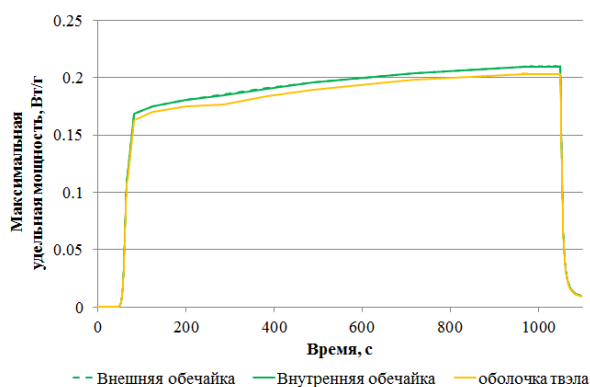
Таблица 2. Доля запаздывающего энерговыделения в конструктивных элементах конвертора от общей доли

Материал	Масса, г	Доля запаздывающего энерговыделения в зависимости от температуры АЗ ИГР							
		293 К	400 К	500 К	600 К	700 К	800 К	1000 К	1200 К
верхний твэл									
Оболочка	19	0,240	0,224	0,206	0,216	0,202	0,179	0,186	0,165
Рубашка охлаждения	108	0,165	0,174	0,154	0,155	0,139	0,126	0,132	0,118
Кадмий	185	0 (энергия выделяется мгновенно)							
Тепловой экран	147	0,146	0,154	0,144	0,139	0,128	0,129	0,118	0,112
Корпус	206	0,141	0,151	0,139	0,131	0,124	0,123	0,109	0,101
нижний твэл									
Оболочка	19	0,259	0,227	0,214	0,224	0,211	0,212	0,194	0,180
Рубашка охлаждения	108	0,252	0,238	0,225	0,223	0,216	0,200	0,196	0,186
Корпус	206	0,252	0,250	0,237	0,234	0,221	0,215	0,198	0,191
защитные чехлы									
Защитный корпус	21770	0,113	0,109	0,102	0,100	0,094	0,088	0,081	0,075
Ампула WF	117780	0,095	0,091	0,086	0,082	0,076	0,073	0,066	0,060

**РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА  
С КОНВЕРТОРОМ НЕЙТРОНОВ**



а) верхний твэл



б) нижний твэл

Рисунок 6. Диаграмма мощности конструктивных элементов испытательной секции

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ЧЕХЛОВ**

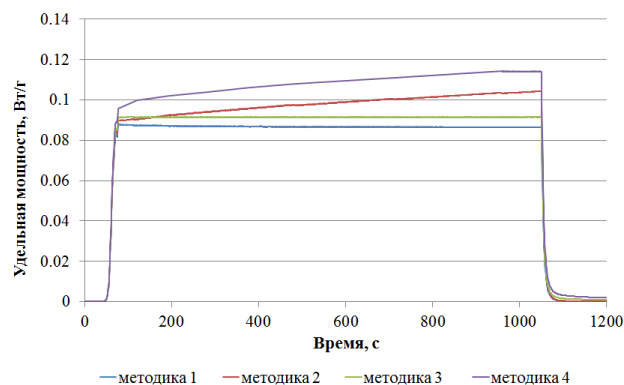
Также были проведены нейтронно-физические расчеты диаграммы мощности и защитного корпуса. Это позволяет наглядно сравнить различие в результатах расчета при учете различных физических процессов в реакторе.

Результаты расчетов энерговыделения представлены в таблице 2, диаграммы мощностей изображены на рисунке 7. Использование методики, учитывающей изменение нейтронно-физических характеристик в зависимости от температуры АЗ в ходе пуска, позволяет учесть дополнительное энерговыделение и получить более достоверную картину по изменению диаграммы мощности в пуске. Учитывая отсутствие системы охлаждения ампулы и защитного корпуса с ловушкой расплава, пренебрежение дополнительным энерговыделением подвергает опасности перегрева защитной ампулы.

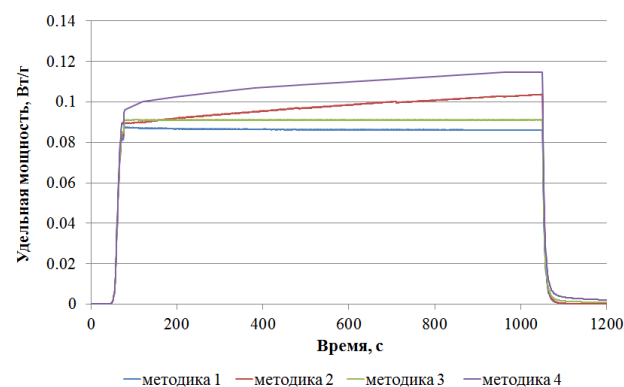
**ВЫВОДЫ**

По итогам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1) Разработана программа, способная рассчитывать реальную диаграмму изменения мощности реактора и распределение температуры в активной зоне;



а) ампула



б) защитный корпус

Рисунок 7. Сравнение расчетных методик по нахождению диаграммы удельной мощности объектов экспериментального устройства

2) Рассчитаны диаграммы мощности твэлов и конструкционных материалов конвертора;

3) Использование констант запаздывающего энерговыделения и способа расчета мощности позволяет увеличить точность расчетов энерговыделения в ЭУ;

4) Использование только значений мгновенной мощности при расчетах энерговыделения в экспериментальных сборках не позволяет точно описать поведение топливных элементов во время испытаний.

Использование и комбинирование методик повышает качество планируемых экспериментов.

В случае учета запаздывающего энерговыделения мощность в конструкционных материалах конвертора увеличивается от 14 до 26%. Учет всех видов энерговыделения первостепенно важен для безопасного проведения экспериментов на реакторе ИГР, во избежание аварийных ситуаций.

*Работа выполнена в рамках мероприятия «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан на 2018–2020 годы», бюджетной программы «Развитие атомных энергетических проектов», тема «Исследование поведения твэлов быстрых реакторов в тяжелых авариях».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курчатов И.В. Импульсный графитовый реактор ИГР / Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. и др. // Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 6, с. 463–474.
2. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертор нейтронов для испытания твэлов быстрых реакторов. // Патент на изобретение РК № 33207 от 15.10.2018, бюл. № 40.
3. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертер нейтронов ИГР для испытаний твэлов быстрых реакторов / Котов В.М., Жанболатов О.М. // Вестник НЯЦ РК. 2017. № 1(69). С.98–102.
4. Котов В.М. Изучение возможности проведения экспериментов в реакторе ИГР с твэлом на быстрых нейтронах / Котов В.М., Жанболатов О.М. // Вестник НЯЦ РК.– 2018.– № 4(76).– С. 18–21.
5. Котов В.М. Конвертор тепловых нейтронов в быстрые реактора ИГР. / Котов В.М., Жанболатов О.М. // V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». Москва, 2-5 октября 2018, АО «НИКИЭТ». С.336–342.
6. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
7. Вурим А.Д., Котов В.М., Иркимбеков Р.А. и др. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов. // А.с. № 2738 РК, 27.12.2016.
8. Жанболатов О.М. Особенности расчета мощности элементов экспериментального устройства для реакторных испытаний на ИГР / Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. // Вестник НЯЦ РК.– 2020.– № 2. – С. 55–60.

### НЕЙТРОНДЫ ТҮРЛЕНДІРГІШІ БАР ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ ҚҰАТ СЫЗБАСЫН ЕСЕПТЕУ

О.М. Жанболатов, Р.А. Иркимбеков, Н.Е. Мухамедов

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

Мақалада эксперименттік құрылғы элементтерінің қуатын есептеу әдісі сипатталған, оның негізгі мақсаты ИГР термиялық нейтрондық ағынды түрлендіру болып табылады. Бұл әдістеме эксперименттік зерттеулерді жоспарлау кезеңінде сыналған құрылғылардың құрылымдық элементтерінде энергияның бөлінуі туралы мәліметтерді алудың әртүрлі есептеу әдістерін жетілдіру болып табылады.

**Түйінді сөздер:** ИГР, нүктелік кинетика, реактор қуаты.

### CALCULATION OF THE POWER DIAGRAM OF AN EXPERIMENTAL DEVICE WITH A NEUTRON CONVERTER

O.M. Zhanbolatov, R.A. Irkimbekov, N.E. Mukhamedov

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

The article presents a method for calculating the power of the elements of an experimental device, the main purpose of which is to convert the thermal neutron flux of the IGR. This technique is an improvement of various calculation methods for obtaining data on energy release in structural elements of tested devices at the stage of planning experimental studies.

**Keywords:** IGR, point kinetics, reactor power.