

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»
Филиал «Институт атомной энергии»
(Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК)

УДК 621.039.6

Жанболатов Олжас Муратбекович

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

Работа, представленная на конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
(фундаментальные исследования)

Руководитель: Иркимбеков Р.А.,
Начальник лаборатории исследований
теплофизических и нейтронно-физических
характеристик облучательных устройств, Phd
Институт атомной энергии

г. Курчатов, 2020 г.

АВТОР

Жанболатов Олжас Муратбекович

Инженер 2 категории лаборатории исследований теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств
Филиала «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК»,
1990 года рождения,
образование высшее (окончил ЕНУ имени Гумилева в 2012 году),
специальность – «Математика»,
работает в Филиале «ИАЭ» РГП НЯЦ РК с 2015 г.,
общий стаж работы – 5 лет.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Начальник лаборатории
исследований
теплофизических и
нейтронно-физических
характеристик облучательных
устройств


подпись, дата

13.04.2020 Р.А. Иркимбеков

инженер 2 категории
лаборатории исследований
теплофизических и
нейтронно-физических
характеристик облучательных
устройств


подпись, дата

13.04.2020 О.М. Жанболатов

ЖАНБОЛАТОВ О.М.

Расчет диаграммы мощности экспериментального устройства с конвертором нейтронов

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
от Филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»

071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10,
тел. (7-722-51) 3-31-25, 41-01 (вн.)
факс (7-722-51) 3-31-25
e-mail: zhanbolatov@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит 18 страниц, 7 рисунков, 3 таблицы, 12 источников.

ДИАГРАММА МОЩНОСТИ РЕАКТОРА, ИМПУЛЬСНЫЙ ГРАФИТОВЫЙ РЕАКТОР, ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

Объект исследования: нейтронно-физические процессы, происходящие в экспериментальном устройстве (ЭУ) при моделировании внутриреакторного эксперимента на реакторе ИГР.

Цель исследования: Моделирование диаграммы мощности ЭУ с конвертором нейтронов ИГР с помощью различных методик расчета.

Задачи исследования:

- создание нейтронно-физических моделей ЭУ с различными характеристиками реактора;
- расчет энерговыделения твэлов и конструкционных материалов;
- построение диаграммы мощности ЭУ с помощью программы расчета кинетики реактора ИГР, используя данные нейтронно-физических расчетов;
- анализ полученных результатов.

Актуальность работы:

В настоящее время в мире продолжается развитие технологии быстрых реакторов 4 поколения. В филиале ИАЭ активно проводятся экспериментальные исследования в обоснование безопасности реакторов на быстрых нейтронах. ИГР является тепловым импульсным реактором. Высокое значение достижимого в нем потока нейтронов и энерговыделения в одном пуске позволяют проводить рекордные испытания для многих образцов реакторной техники.

Для эффективного исследования процессов, происходящих в реакторе, необходимо совершенствование методологии подготовки и проведения пусков реактора на основе развития появления эффективных программ расчетов нейтронно-физических и теплофизических характеристик, как объектов исследований, так и самого реактора.

Результаты работы: результаты исследования будут использованы в исследовании анализа безопасного проведения различных экспериментов с экспериментальными сборками на реакторе ИГР.

Научная новизна: заключается в совершенствовании расчетных методов, в которых впервые учитывался гамма разогрев и запаздывающее энерговыделение конструкционных материалов ЭУ. Использование объединенной методики расчета диаграммы мощности ЭУ.

Практическая ценность: учет запаздывающего энерговыделения конструкционных элементов позволяет точнее и эффективнее прогнозировать ход эксперимента..

Личный вклад автора: построение расчетных моделей, проведение нейтронно-физических расчетов, обработка и анализ результатов.

Степень завершенности работы: разработаны объединенные нейтронно-физические модели ЭУ с реактором ИГР, учитывающие температуру кладки и положение органов регулирования. Получено распределение энерговыделения в твэлах и конструкционных

материалах ЭУ. Получена диаграмма мощности ИГР, диаграмма мощности твэлов и конструкционных элементов.

Уровень публикаций:

Результаты конкурсной работы были апробированы в международных и отечественных конференциях и опубликованы в виде тезисов и статей в следующих журналах:

1. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертер нейтронов ИГР для испытаний твэлов быстрых реакторов. // Вестник НЯЦ РК. 2017. №1(69). С.98-102

2. Котов В.М., Жанболатов О.М. Изучение возможности проведения экспериментов в реакторе ИГР с твэлом на быстрых нейтронах. // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – №4(76). – С.18-21

3. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертор тепловых нейтронов в быстрые реактора ИГР. // V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». Москва, 2-5 октября 2018, АО «НИКИЭТ». С.336-342

4. Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. Моделирование точечной кинетики реактора ИГР с учетом временного распределения выделенной энергии деления // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – №3. – С.59-61

5. Алгоритм решения математической модели точечной кинетики с учетом запаздывающего энерговыделения / Жанболатов О.М., Бакланова О.Е. // 6 Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», Усть-Каменогорск, 9-10 апреля 2020 г.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ИГР – импульсный графитовый реактор;

АЗ – активная зона;

КС – компенсирующий стержень;

ПС – пусковой стержень;

ЦЭК – центральный экспериментальный канал;

ЭУ – экспериментальное устройство;

КН – конвертор нейтронов.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
1 Схема экспериментального устройства	7
2 Расчетные методики	10
2.1 Расчет диаграммы мощности реактора	11
2.2 Математическое решение расчета мощности конструкционных материалов с учетом запаздывающего энерговыделения	13
2.3 Диаграмма мощности реактора ИГР	13
2.4 Расчет мощности экспериментального устройства	14
2.4.1 Расчет диаграммы мощности топлива ЭУ	14
2.4.2 Расчет диаграммы мощности конструкционных материалов	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	18

ВВЕДЕНИЕ

Долгосрочное развитие атомной промышленности связано с реакторами на быстрых нейтронах. Одним из приоритетных вопросов является безопасность реакторов даже в случае аварийных ситуаций. Для решения подобных вопросов необходимо достаточное количество экспериментальных исследований. Реактор ИГР [1] является исследовательским реактором с уникальными нейтронно-физическими характеристиками. Однако время работы ИГР составляет короткий промежуток времени в сравнении с энергетическим реактором. Вследствии этого поле энерговыделения в активной зоне не является стационарным, как и энерговыделение осколков деления, которое выделяется с определенным запаздыванием во времени. Данное обстоятельство усложняет достижение целей экспериментов. Проблема с распределением мощности становится особенно актуальной в случае отсутствия или ограничения охлаждения различных испытываемых элементов.

Выходом является улучшение точности расчетов, предшествующих эксперименту. Для этого при моделировании и планировании эксперимента необходимо рассматривать физический процесс более детально и приближенно к реальности.

Данная работа ставит целью получение расчетных данных изменения мощности топлива и конструкционных материалов экспериментального устройства во времени с высокой точностью. Исследуется вопрос расчета энерговыделения в топливе и материалах, количественная оценка запаздывающего энерговыделения в общей доле. Это является необходимым как для обеспечения безопасности проведения самого эксперимента, так и для достижения целей испытания устройств. В работе исследуется экспериментальное устройство с конвертором нейтронов ИГР, которое ставит непростую задачу преобразования спектра тепловых нейтронов реактора в быстрые.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

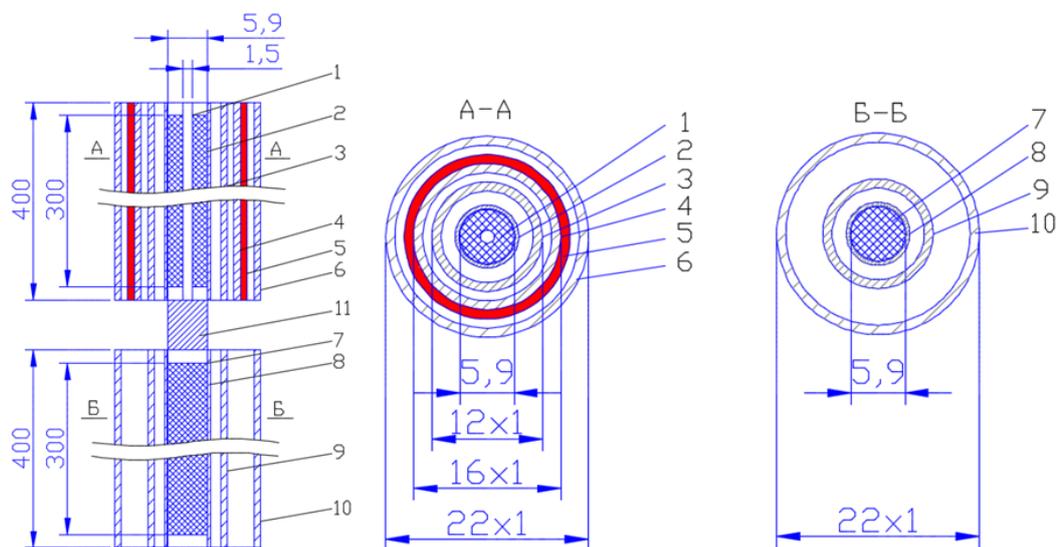
1. Схема экспериментального устройства

В результате многочисленных расчетов в обоснование конструкции устройства [2–5], обеспечивающей достижение требуемых параметров в ходе реакторных испытаний, предложена конструкция испытательной секции конвертора.

На рисунке 1 представлены геометрия и размеры элементов предлагаемого экспериментального устройства. 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 ТВЭЛх одинакова и равна 300 мм. Топливные таблетки из диоксида урана

расположены в оболочке, которая представляет собой трубку с размерами 6,9×0,4 мм, выполненную из стали X16H15M3Б. 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.



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

Рисунок 1. Эскиз конструкции испытательной секции

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}U , конвертер тепловых нейтронов в быстрые (кадмиевая трубка).

Нижний твэле содержит кадмиевого поглотителя и набирается из топливных таблеток диоксида урана массой около 86 г с обогащением 0,27 % по ^{235}U (таблица 1).

В обоих твэлах между топливными таблетками в нижней, средней и верхней частях твэлов устанавливаются активационные детекторы из никелевой фольги в виде диска диаметром 5,9 мм, толщиной 0,1 мм.

Таблица 1 – Параметры твэлов

Параметр	Значение
Топливо	UO_2
Обогащение топлива по ^{235}U , %	
в верхнем твэле	~17
в нижнем твэле	~0,27
Плотность топлива, г/см ³	10,3 – 10,8

Параметр	Значение
Диаметр, мм топливной таблеткинаружный центрального отверстия (для верхнего ТВЭЛ)	5,9±0,02 1,5±0,1
Высота топливного столба в ТВЭлах, мм	300
Количество топлива, кг в верхнем ТВЭле в нижнем ТВЭле	0,08 0,086
Количество активационных детекторов, шт в верхнем ТВЭле в нижнем ТВЭле	3,0 3,0

На основе эскиза было составлен технический проект на экспериментальное устройство с конвертером нейтронов (ЭУ с КН), представленный на рисунке 2.

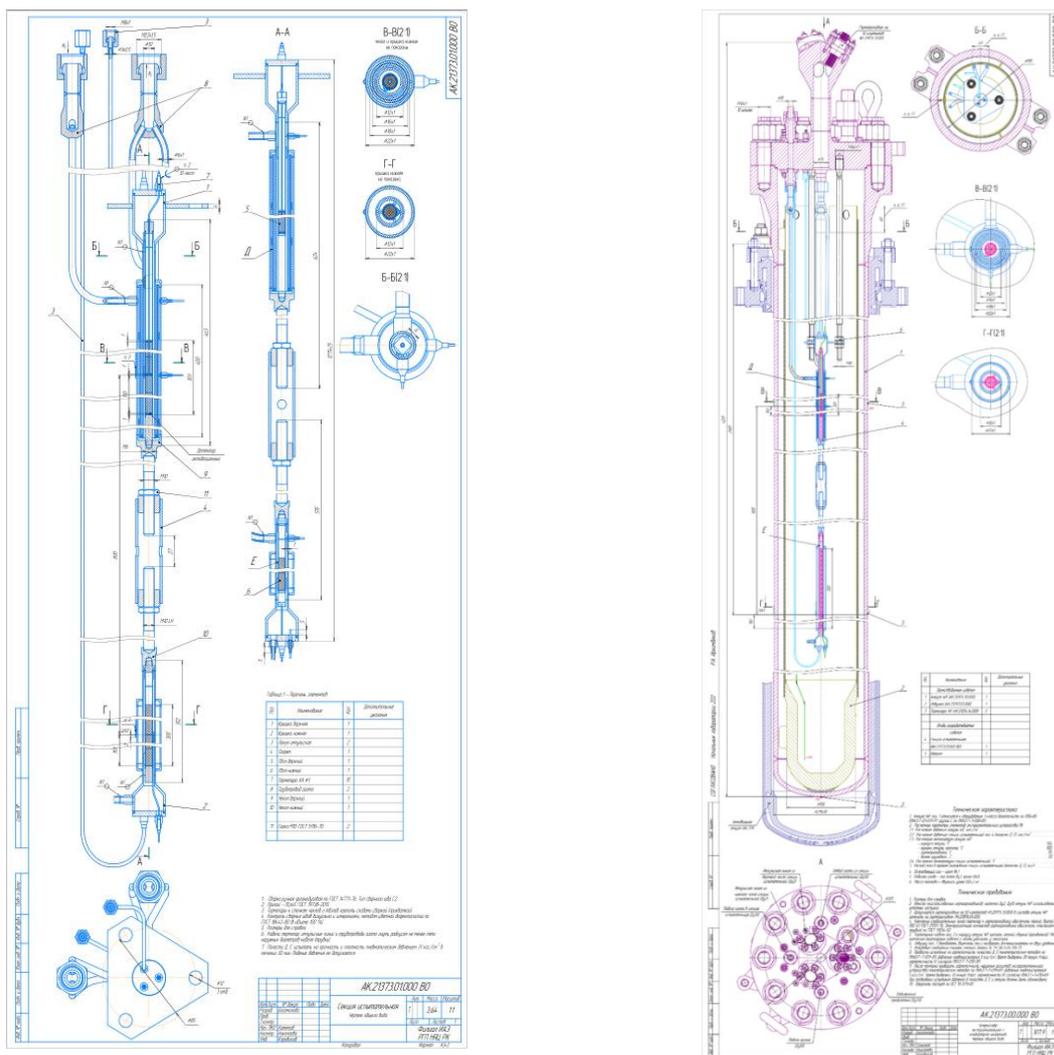


Рисунок 2 – Технический проект экспериментального устройства с конвертером нейтронов

2. Расчетные методики

Управление реактором при проведении эксперимента основано на знании зависимости мощности в исследуемом устройстве и в реакторе. Для определения энергетических параметров топлива и конструкционных материалов ЭУ с учетом нагрева графитовой кладки реактора ИГР, был выполнен ряд нейтронно-физических расчетов с помощью программы MCNP5 [6] с библиотекой ENDF/B-VI. При проведении расчетов использовалась модель реактора ИГР [7], детально описывающая реальную конструкцию, и учитывающая неравномерность распределения концентрации урана в объеме активной зоны. В центральный экспериментальный канал ИГР помещена испытательная секция ЭУ с КН (рисунок 3), защитный корпус с ловушкой расплава и защитная ампула WF. Моделирование ЭУ осуществлялось с соблюдением основных размерно-материальных характеристик. Объединенная расчетная нейтронно-физическая модель ЭУ с КН и ИГР, описывающая конструкцию и последовательность планируемых событий в эксперименте применяется далее для проведения расчетов.

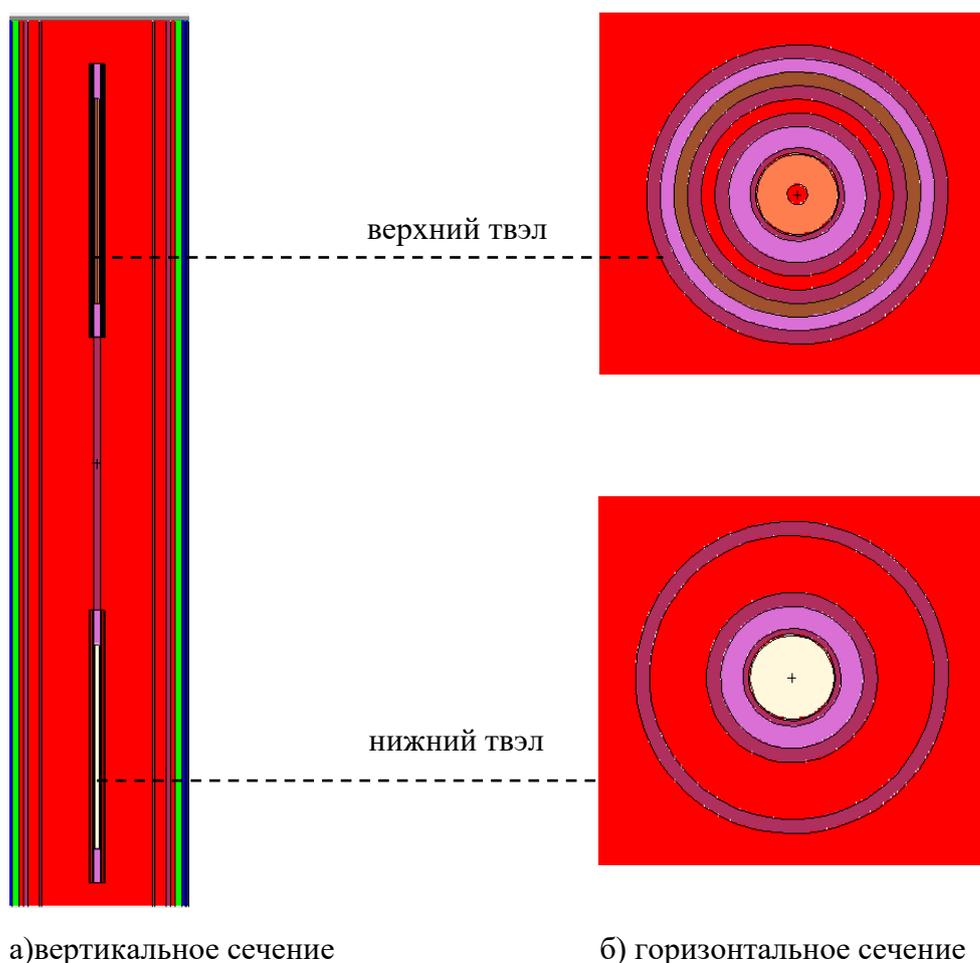


Рисунок 3 – Объединенная модель ИГР и экспериментального устройства для нейтронно-физического расчета

Основная цель нейтронно-физических расчетов – определение отношения мощности устройства к мощности реактора. Все вычисления выполнялись для холодного (температура графитовой кладки реактора 294 К) и горячих состояний реактора (400 – 1200 К) в предположении, что разогрев графитовой кладки и положение стержней регулирования реактора влияет на распределение энерговыделения в объеме испытываемого экспериментального устройства.

Нейтронно-физические расчеты обеспечивали получение данных о спектре нейтронов в центральной области конвертора, распределении потока нейтронов в испытываемых твэлах, в поглотителе тепловых нейтронов и во внешней области конвертора.

2.1 Расчет диаграммы мощности реактора

Расчет диаграммы мощности реактора ИГР выполняется с помощью программы, написанной на языке Visual Basic в программном комплексе Microsoft Visual Studio.

В процессе работы программы последовательно выполняется чтение входных данных, представленных в текстовом формате. Данные представлены в виде положения компенсирующих и пусковых стержней в определенный момент времени, по аналогии с получаемыми во время пусков ИГР. Также пользователь вводит значение начальной реактивности, время жизни нейтронов, длительность пуска и т.д.

Следующим этапом идет выполнение расчета потока нейтронов, мощности реактора и других нейтронно-физических параметров. Расчет выполняется с помощью уравнения точечной кинетики, учитывающей запаздывающее энерговыделение[8]. К источникам запаздывающего энерговыделения относят энергию осколочного излучений. Она выделяется в течение длительного промежутка времени, так как сами процессы β , γ – распадов происходят с большими сдвигами во времени по отношению к моменту деления ядра.

Модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений 1 порядка, описывающих изменение концентрации источников запаздывающего энерговыделения и представлена ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - 1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot c_i(t) + s \\ \frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t) \\ W_{мгн} = C_u \cdot \sigma_f \cdot E_f \cdot V_{аз} \cdot \varphi(t) \\ \frac{dC_{\gamma j}(t)}{dt} = YB \cdot W_{мгн} \cdot \beta_{\gamma j} - \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{общ} = W_{мгн} + W_{зап} \\ W_{зап} = \sum_j \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \end{array} \right. \quad (1)$$

где n – плотность нейтронов реактора;

c_i – плотность ядер-предшественников;

t – время;

$\rho(t)$ – реактивность;

l – время жизни нейтронов;

λ_i – постоянная распада ядер-предшественников;

β_i – доля запаздывающих нейтронов;

s – эффективная мощность источника;

YB – доля запаздывающего энерговыделения в общей доле энерговыделения;

$\lambda_{\gamma j}$ – константы распада j –группы;

$\beta_{\gamma j}$ – доля запаздывающего энерговыделения j –группы;

$C_{\gamma j}(t)$ – концентрация источников запаздывающего излучения.

Математическое описание алгоритма расчета описано в [9]. Значения долей и постоянных полураспада запаздывающего энерговыделения даны в [8]. Рассчитанные характеристики запаздывающего энерговыделения представлены в таблице 2.

Таблица 2. Свойства групп запаздывающего энерговыделения

Номер группы j	Период полураспада, с	Постоянная распада $\lambda_{\gamma j}$, с ⁻¹	Доля запаздывающего энерговыделения j –группы
1	0,001	693,1	0,000014
2	0,01	69,31	0,13
3	0,1	6,931	0,13
4	1	0,6931	0,13
5	10	0,06931	0,13

6	100	$6,931 \cdot 10^{-3}$	0,13
7	1000	$6,931 \cdot 10^{-4}$	0,13
8	10000	$6,931 \cdot 10^{-5}$	0,13
9	100000	$6,931 \cdot 10^{-6}$	0,07
10	1000000	$6,931 \cdot 10^{-7}$	0,008

2.2 Математическое решение расчета мощности конструкционных материалов с учетом запаздывающего энерговыделения

Вычисленная система констант также позволяет рассчитать запаздывающее энерговыделение конструкционных материалов реактора и экспериментальных устройств, испытываемых в ЦЭК ИГР. Для этого используются следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{\text{к.м.}} = K * W_{\text{общ реактора}} \\ \frac{dC_{\gamma j}(t)}{dt} = Y_{B_{\text{к.м.}}} \cdot W_{\text{к.м.}} \cdot \beta_{\gamma j} - \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{зап к.м.}} = \sum_j \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{общ к.м.}} = W_{\text{МГН к.м.}} + W_{\text{зап к.м.}} \end{array} \right. \quad (2)$$

где K – коэффициент отношения мощности материала к мощности реактора. Коэффициент рассчитывается с помощью нейтронно-физической модели реактора ИГР в программном комплексе MCNP5;

$Y_{B_{\text{к.м.}}}$ – доля запаздывающего энерговыделения в общей доле энерговыделения конструкционного материала;

$\lambda_{\gamma j}$ – константы распада – группы запаздывающего энерговыделения;

$\beta_{\gamma j}$ – доля запаздывающего энерговыделения – группы;

$C_{\gamma j}(t)$ – концентрация источников запаздывающего излучения.

2.3 Диаграмма мощности реактора ИГР

Используя положение стержней регулирования в критическом состоянии реактора из нейтронно-физических расчетов мощности ЭУ, была рассчитана следующая диаграмма мощности, в режиме контролируемый «импульс». Начальная реактивность – 1,0 β эфф. Расчетное энерговыделение в реакторе составляет 5,2 ГДж, средняя мощность – 5,15 МВт, время пуска 1050 секунд. Конечная температура 1271 К. Полученная диаграмма представлена на рисунке 4.

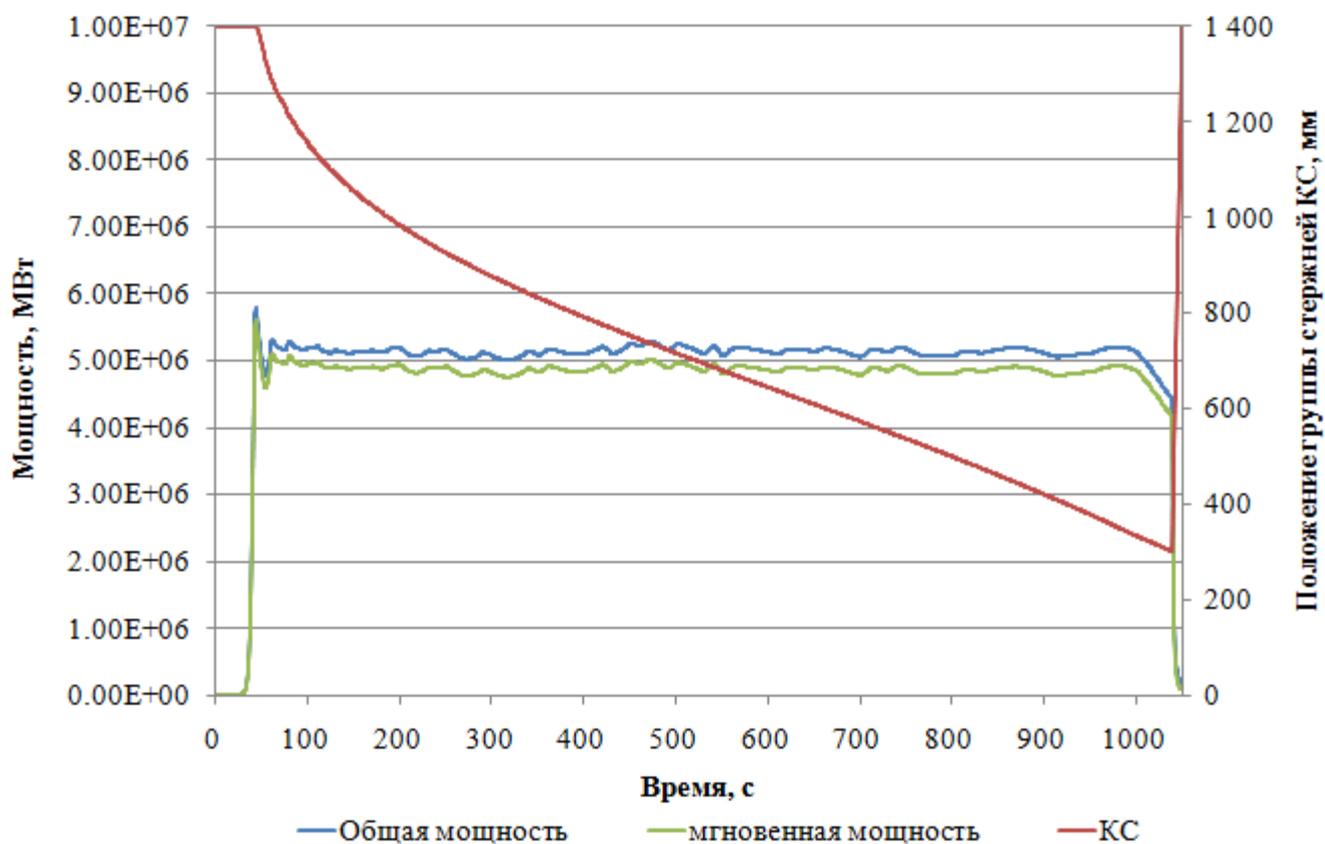


Рисунок 4. Расчетная диаграмма мощности реактора

На диаграмме заметно отклонение общей мощности реактора от мгновенной (5,8 %). На режимах испытаний с полным интегральным энерговыделением в реакторе - 5,2 ГДж, учет любого вида энергии является очень важным с точки зрения достижения целей эксперимента.

2.4 Расчет мощности экспериментального устройства

2.4.1. Расчет диаграммы мощности топлива ЭУ

Для нахождения диаграммы мощности топлива необходимо использовать результаты расчетов нейтронно-физических характеристик с помощью модели реактора. Полученные значения отношения мощности твэла к мощности реактора для температурного диапазона работы ИГР (294 – 1200 К) позволяют точнее смоделировать поведение твэлов в испытании. Разогрев графитовой кладки может изменить отношение энерговыделения в топливе и в реакторе в пределах 10 % при реализации полного интеграла энерговыделения [10]. Разогрев топлива и конструкционных материалов ЭУ (с сохранением исходной конфигурации) может изменить значение отношения энерговыделения в топливе и в реакторе в пределах 1 % [11,12]. На рисунках 5 и 6 изображены диаграммы мощностей верхнего и нижнего твэлов с учетом разогрева активной зоны реактора.

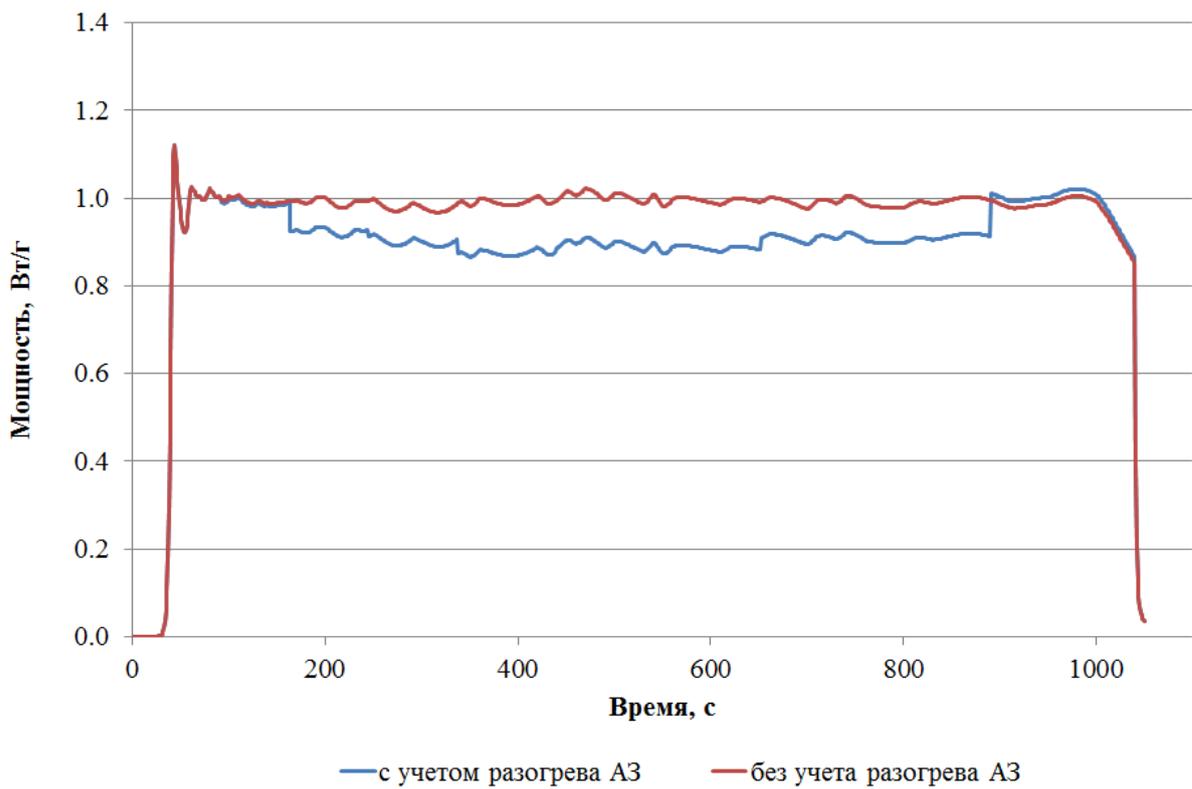


рисунок 5. Диаграмма мощности верхнего твэла

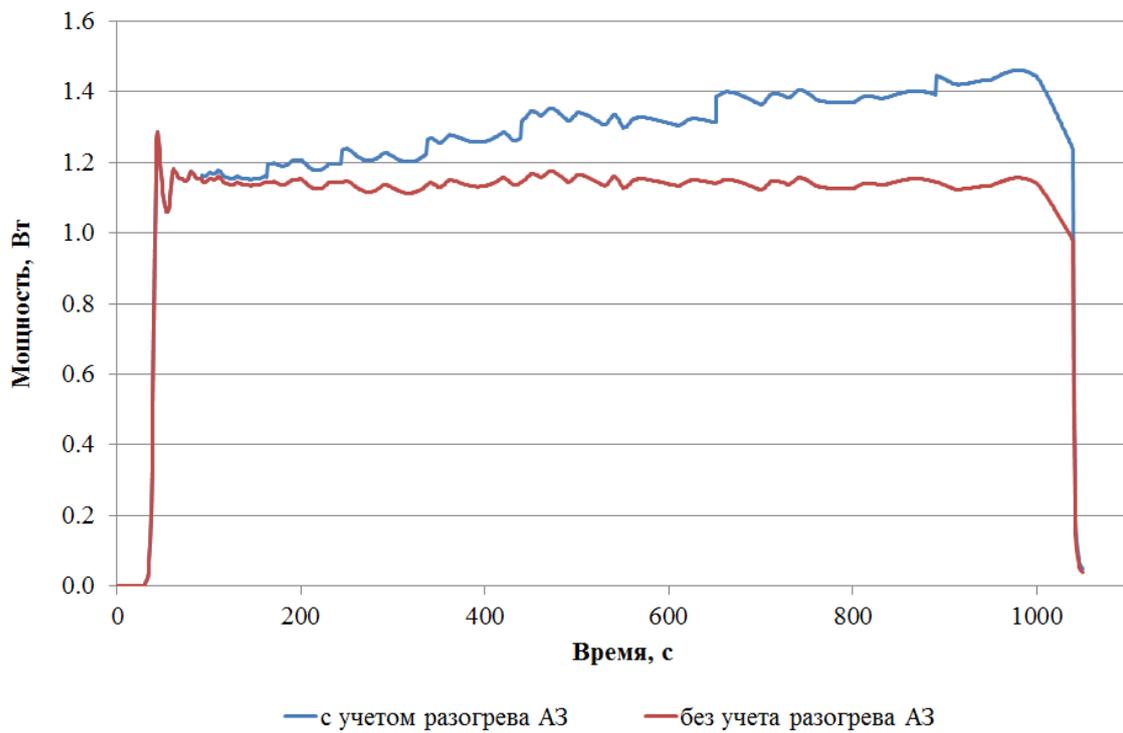


рисунок 6. Диаграмма мощности нижнего твэла

На диаграммах заметно, расхождение в профилях энерговыделения как верхнего так и нижнего твэлов. Повышение температуры активной зоны вносит изменение в отношении

энерговывделений топлива к реактору, что изменяет диаграмму мощности твэла по сравнению со стандартной методикой.

2.4.2 Расчет диаграммы мощности конструкционных материалов

Энерговывделение в конструкционных материалах происходит в основном благодаря радиационному разогреву гамма излучений. Для расчета диаграммы мощности используется приведенная выше система уравнений (2). Однако, в случае энерговывделения материалов запаздывающее излучение играет большую роль. Если 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 энерговывделения во всех элементах испытательной секции. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Доля запаздывающего энерговывделения материалах конвертора от общей доли

Материал	Масса, г	Доля запаздывающего энерговывделения
Верхний твэл		
Оболочка	19	0,24
Рубашка охлаждения	108	0,16
Кадмий	185	0 (вся энергия выделяется мгновенно)
Тепловой экран	147	0,15
Корпус	206	0,14
Нижний твэл		
Оболочка	19	0,26
Рубашка охлаждения	108	0,25
Корпус	206	0,25

Далее, полученные значения используется для получения диаграммы мощности конструкционных элементов с помощью системы (2).

На рисунке 7 представлены диаграммы элементов верхнего твэла.

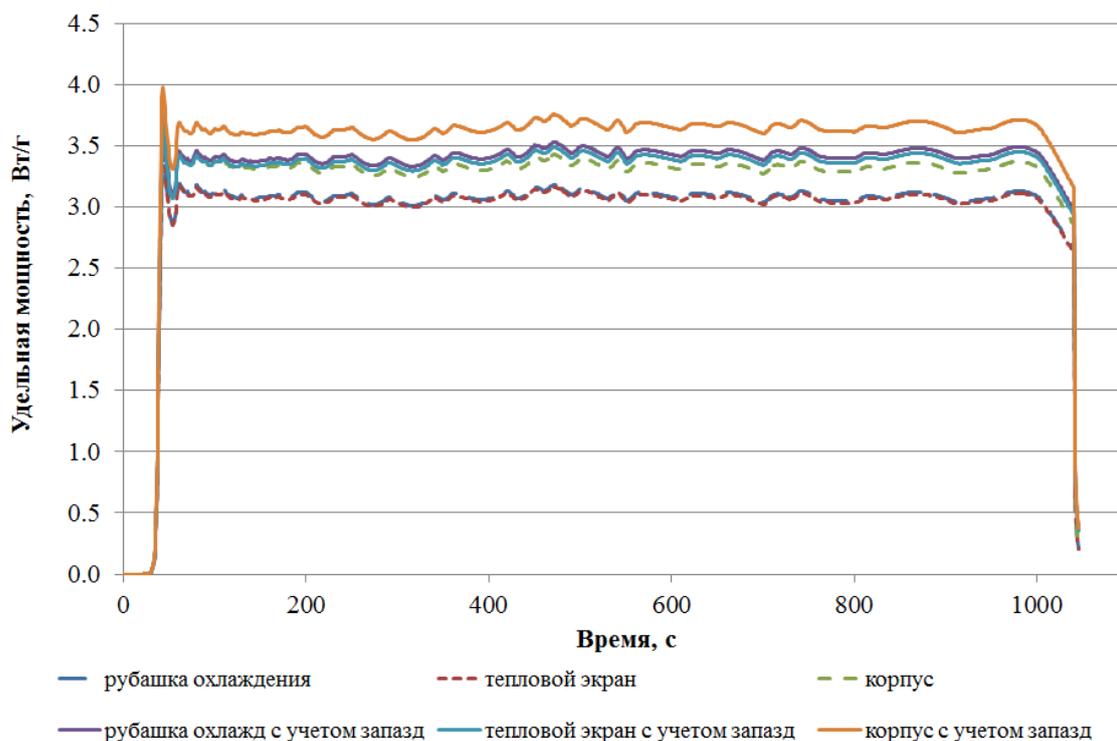


Рисунок 7. Диаграмма мощности конструктивных элементов быстрого твэла

Энерговыведение конструктивных элементов в случае учета запаздывающей мощности заметно выше (15- 20 %)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы:

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

Рассчитаны диаграммы мощности твэлов и конструктивных материалов конвертора;

Использование констант запаздывающего энерговыведения и способа расчета мощности позволяет увеличить точность расчетов энерговыведения в ЭУ;

Использование только значений мгновенной мощности при расчетах энерговыведения 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 энерговыведения мощность в конструктивных материалах конвертора увеличивается от 14 до 26 %. Учет всех видов энерговыведения первостепенно важен для безопасного проведения экспериментов на реакторе ИГР, во избежание аварийных ситуаций.

Работа выполнена в рамках Именной стипендии Генерального директора НЯЦ РК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. и др. Импульсный графитовый реактор ИГР. // 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. // Вестник НЯЦ РК. 2017. №1(69). С.98-102
4. Котов В.М., Жанболатов О.М. Изучение возможности проведения экспериментов в реакторе ИГР с твэлом на быстрых нейтронах. // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – №4(76). – С.18-21
5. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертор тепловых нейтронов в быстрые реактора ИГР. // 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., Иркимбеков Р.А. Моделирование точечной кинетики реактора ИГР с учетом временного распределения выделенной энергии деления // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – №3. – С.59-61
9. Алгоритм решения математической модели точечной кинетики с учетом запаздывающего энерговыделения / Жанболатов О.М., Бакланова О.Е. // 6 Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», Усть-Каменогорск, 9-10 апреля 2020 г.
10. 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.
11. Методика определения энергетических параметров внутриреакторных импульсных экспериментов: дис. ... канд. физ-мат. наук.: 01.04.14: защищена 28.12.13 / В.А. Витюк. – НИ ТПУ. – Томск, 2013. – 129 с.
12. Энерговыделение в модельной ТВС при тепловых испытаниях в импульсной реакторной установке: дис. ... канд. физ-мат. наук.: 01.04.14: защищена 07.10.16 / Р. А. Иркимбеков. – НИ ТПУ. – Томск, 2016. – 129 с.