

УДК 621.039, 51-74

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧЕЧНОЙ КИНЕТИКИ РЕАКТОРА ИГР С УЧЕТОМ ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ ДЕЛЕНИЯ

1, 2) Жанболатов О.М., 1) Иркимбеков Р.А.

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

2) ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

В данной работе определены параметры источников запаздывающего энерговыделения, составлена математическая модель точечной кинетики реактора с учетом временного распределения энергии деления. Данные расчетные исследования помогут точнее подбирать необходимую диаграмму мощности на стадии подготовки к эксперименту на реакторе ИГР.

**Ключевые слова:** импульсный графитовый реактор, точечная кинетика реактора, запаздывающее энерговыделение, концентрация источников запаздывающего энерговыделения.

### ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором для развития атомной промышленности является наличие современной экспериментальной базы и ее эффективное использование. Экспериментальные исследования и испытания, которые были проведены и проводятся на исследовательском реакторе ИГР, практически всегда связаны с получением информации о быстропротекающих физических процессах в ядерных реакторах, о работоспособности объектов испытаний в нормальных и аварийных условиях эксплуатации, о поведении топлива и конструкционных материалов для обоснования безопасности систем и элементов ядерных энергетических установок.

Одним из приоритетных направлений является улучшение точности экспериментальных расчетных методик. Для этого необходимо при моделировании и планировании эксперимента рассматривать физический процесс более детально и приближенно к реальности.

В данной работе предложена математическая модель точечной кинетики реактора ИГР, учитывающая запаздывающее энерговыделение. Результаты работы в данном направлении помогут повысить представительность экспериментов, проводимых на реакторе ИГР.

### ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДРА УРАНА 235

Тепловая энергия  $E_f$ , выделяющаяся в акте деления ядра урана 235, представляется следующим образом:

$$E_f = E_k + \Delta E_n + E_\beta + E_{\gamma\text{мгн}} + E_{\gamma\text{зап}} + E_{\text{захв}}. \quad (1)$$

Здесь  $E_k$  – кинетическая энергия осколков деления после вылета мгновенных нейтронов,  $\Delta E_n$  – разница между конечной и начальной кинетической энергией нейтронов деления,  $E_\beta$  – энергия бета частиц, испускаемые осколками и продуктами деления,  $E_{\gamma\text{мгн}}$  – энергия гамма квантов, вылетающих из продуктов деления до их распада,  $E_{\gamma\text{зап}}$  – энергия гамма квантов, испускаемых продуктами деления в серии бета распадов, т.е. так называемых запаздывающих гамма

квантов,  $E_{\text{захв}}$  – энергия, выделяющаяся при поглощении нейтронов, не сопровождающаяся делением. В основном  $E_{\text{захв}}$  – это  $E_{\gamma\text{захв}}$ , т.е. энергия гамма-квантов, испускаемых возбужденными ядрами, образующимися в результате захвата нейтронов исходными ядрами. В таблице 1 приведено распределение энергии при делении ядра  $^{235}\text{U}$  из различных справочных источников [1, 2].

Таблица 1. Характеристики составляющих энерговыделения  $^{235}\text{U}$

Составляющие энерговыделения	Значения энергии [1], МэВ	Значения энергии [2], МэВ
$E_k$	166,2	169,12
$\Delta E_n$	4,6	4,79
$E_\beta$	7,0	6,5
$E_{\gamma\text{мгн}}$	8,0	6,97
$E_{\gamma\text{зап}}$	7,2	6,33
$E_{\text{захв}}$	9,6	8,75

Различные составляющие энергии деления трансформируются в тепло не одновременно. Кинетическая энергия осколков деления, энергия нейтронов деления и  $\gamma$ -квантов, сопровождающих деление, выделяется в твэлах практически мгновенно, непосредственно в процессе деления, время которого составляет примерно  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  с. Данные составляющие энерговыделения называются мгновенными.

К источникам запаздывающего энерговыделения относят энергию осколочного излучений. Она выделяется в течение длительного промежутка времени, так как сами процессы  $\beta$ -,  $\gamma$ -распадов происходят с большими сдвигами во времени по отношению к моменту деления ядра.

### ОТЛИЧИЯ В КИНЕТИКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРОВ

При стационарном режиме работы энергетического реактора энерговыделение осколков также выходит на стационарный уровень. Поэтому в математической модели точечной кинетики реактора пренебрегают энерговыделением осколков деления. Роль запаздывающего энерговыделения возрастает при останове реактора, когда возникает необходимость

длительное время обеспечивать теплоотвод от активной зоны реактора. Расчет остаточного тепловыделения хорошо описывается формулой Вэй-Вигнера.

Исследовательский реактор ИГР работает ограниченный промежуток времени, в среднем 10–100 секунд. Запаздывающее энерговыделение не выходит на стационарный уровень и имеет сложную зависимость. Следовательно, учет любого вида энергии является приоритетным для улучшения точности расчетного планирования эксперимента.

#### ТОЧЕЧНАЯ КИНЕТИКА РЕАКТОРА

Для моделирования кинетики ИГР решается система уравнений точечной кинетики с шестью группами запаздывающих нейтронов, которое выводится из уравнения диффузии [3]:

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - 1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot c_i(t) + s \\ \frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

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.

Кинетика реактора зависит от свойств групп запаздывающих нейтронов делящегося вещества. В случае деления  $U^{235}$  имеются шесть групп запаздывающих нейтронов, характеристики которых представлены в таблице 2 [4].

Таблица 2. Свойства запаздывающих нейтронов

Номер группы $i$	Постоянная распада $\lambda_i$ , с <sup>-1</sup>	Среднее время жизни $l_i$ , с	Доля $\beta_i$ от общего числа запаздывающих нейтронов
1	0,0124	80,2	0,033
2	0,0305	31,3	0,219
3	0,111	6,51	0,196
4	0,301	2,19	0,395
5	1,12	0,62	0,115
6	3,01	0,07	0,042

Поток тепловых нейтронов пропорционален плотности нейтронов и обратно пропорционален времени жизни нейтронов:

$$\varphi(t) = \frac{n(t)}{l\sigma_a N_a} = \frac{n(t)}{lE_a} \quad (3)$$

Мощность реактора пропорциональна потоку тепловых нейтронов, и выражается следующим образом:

$$W_{\text{мгн}}(t) = C_u \cdot \sigma_f \cdot E_f \cdot V_{\text{аз}} \cdot \varphi(t) \quad (4)$$

где  $C_u$  – концентрация ядер урана в этом объеме (1/см<sup>3</sup>);  $\sigma_f$  – макроскопическое сечение деления (см<sup>2</sup>);  $E_f$  – энергия, приходящаяся на одно деление (180 МэВ, соответствующая мгновенным источни-

кам энерговыделения);  $V_{\text{аз}}$  – объем активной зоны реактора;  $\varphi(t)$  – поток тепловых нейтронов.

#### МОДЕЛЬ ТОЧЕЧНОЙ КИНЕТИКИ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Предлагается уточнение модели с помощью добавления в (2) системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентрации источников запаздывающего энерговыделения. Полная мощность реактора будет вычисляться:

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - 1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot c_i(t) + s \\ \frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t) \\ W_{\text{мгн}} = C_u \cdot \sigma_f \cdot E_f \cdot V_{\text{аз}} \cdot \varphi(t) \\ \frac{dC_{\gamma j}(t)}{dt} = YB \cdot W_{\text{мгн}} \cdot \beta_{\gamma j} - \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{общ}} = W_{\text{мгн}} + W_{\text{зап}} \\ W_{\text{зап}} = \sum_j \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \end{cases} \quad (5)$$

где  $YB$  – 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.

Для расчета долей и постоянных полураспада запаздывающего энерговыделения использовалась кривая высвобождения энергии деления ядра  $^{235}\text{U}$  во времени (рисунок) [5].

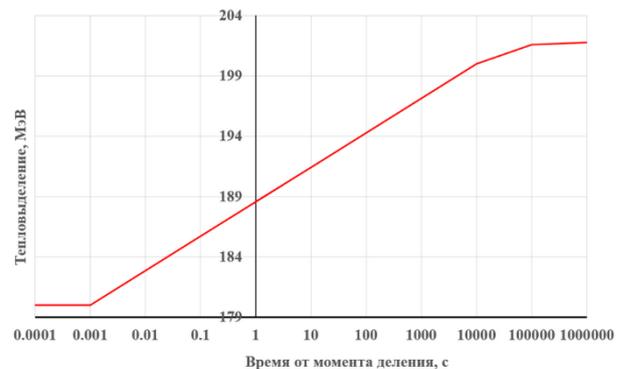


Рисунок 1. Интегральное тепловыделение как функция времени, прошедшего с момента деления ядра  $^{235}\text{U}$

Данная кривая была аппроксимирована следующей функцией –  $f(t)$ :

$$f(t) = \begin{cases} 2,8571 \cdot \lg(t) + 188,5716, & 10^{-3} < t < 10^4 \text{ с;} \\ \ln(\lg(t)) + 200, & t \geq 10^4 \text{ с.} \end{cases} \quad (6)$$

Используя вышеописанную кривую, было решено разделить источники запаздывающего энерговыделения на 10 групп согласно времени излучения. Рассчитанные характеристики запаздывающего энерговыделения представлены в таблице 3.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧЕЧНОЙ КИНЕТИКИ РЕАКТОРА ИГР С УЧЕТОМ ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ ДЕЛЕНИЯ

Таблица 3. Свойства групп запаздывающего энерговыделения

Номер группы $j$	Период полураспада, с	Постоянная распада $\lambda_{vj}$ , с <sup>-1</sup>	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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по ядерной физике пер. с английского под редакцией Л.А. Арцимовича. – М., Физматгиз, 1963 г., – 291 с.
2. Библиотека ядерных констант ENDF/B-V.
3. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986 г. – 20 с.
4. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А. и др. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Учебн. Пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 90 с.
5. Крамеров А. Я., Шевелев Я. В. Инженерные расчёты ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 38 с.

### БӨЛІНГЕН БӨЛІНУ ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ УАҚЫТША ТАРАЛУЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ИГР РЕАКТОРЫНЫҢ НҮКТЕЛІК КИНЕТИКАСЫН МОДЕЛЬДЕУ

<sup>1, 2)</sup> О.М. Жанболатов, <sup>1)</sup> Р.А. Иркимбеков

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> Д.Серікбаев атындағы ШҚМТУ, Өскемен, Қазақстан

Аталған жұмыста кешігуші энергия шығару көздерінің параметрлері анықталды, бөліну энергиясының уақытша таралуын ескере отырып, реактордың нүктелік кинетикасының математикалық моделі жасалды. Бұл есептік зерттеулер ИГР реакторындағы экспериментке дайындық сатысында қажетті қуат диаграммасын дәл таңдауға көмектеседі.

**Кілт сөздер:** импульстік графитті реактор, реактордың нүктелік кинетикасы, кешігуші энергия шығару, кешігуші энергия шығару көздерінің шоғырлануы.

### SIMULATION OF POINT KINETICS OF IGR REACTOR TAKING INTO ACCOUNT TIME DISTRIBUTION OF RELEASED FISSION ENERGY

<sup>1, 2)</sup> O.M. Zhanbolatov, <sup>1)</sup> R.A. Irkimbekov

<sup>1)</sup> Branch «Institute of Atomic Energy» RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

<sup>2)</sup> D. Serikbayev EKSTU, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

The report provides determination of parameters for sources of delayed energy release, prepared mathematical model of the reactor point kinetics taking into account time distribution of fission energy. The calculation research will contribute to more correct selection of necessary power diagram during experiment preparation at IGR reactor.

**Keywords:** impulse graphite reactor, point kinetics of reactor, delayed energy release, concentration of delayed energy release sources..