



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Динамика энерговыделения в активной зоне ядерного реактора

Попов Даниэль Валерьевич
НИЦ «Курчатовский Институт»
НИЯУ МИФИ

Научная сессия секции ЯФ Отделения физических наук РАН

Расчеты тепловой энергии деления

Настоящая работа является развитием предыдущих работ:

- М. F. James, J. Nucl. Energy **23** (1969)
- В. И. Копейкин, Препринт ИАЭ-4305/2, Москва (1986)
- В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, В. В. Синев, ЯФ **67** (2004)
- *В. И. Копейкин, Д. В. Попов, М. Д. Скорохватов, ЯФ (2024)*

Мотивация

$$\Phi_\nu(E, R) = \frac{1}{4\pi R^2} \sum N_f^{(i)} \rho_\nu^{(i)}(E)$$

$$P_{\text{th}} = \sum N_f^{(i)} E_f^{(i)}$$

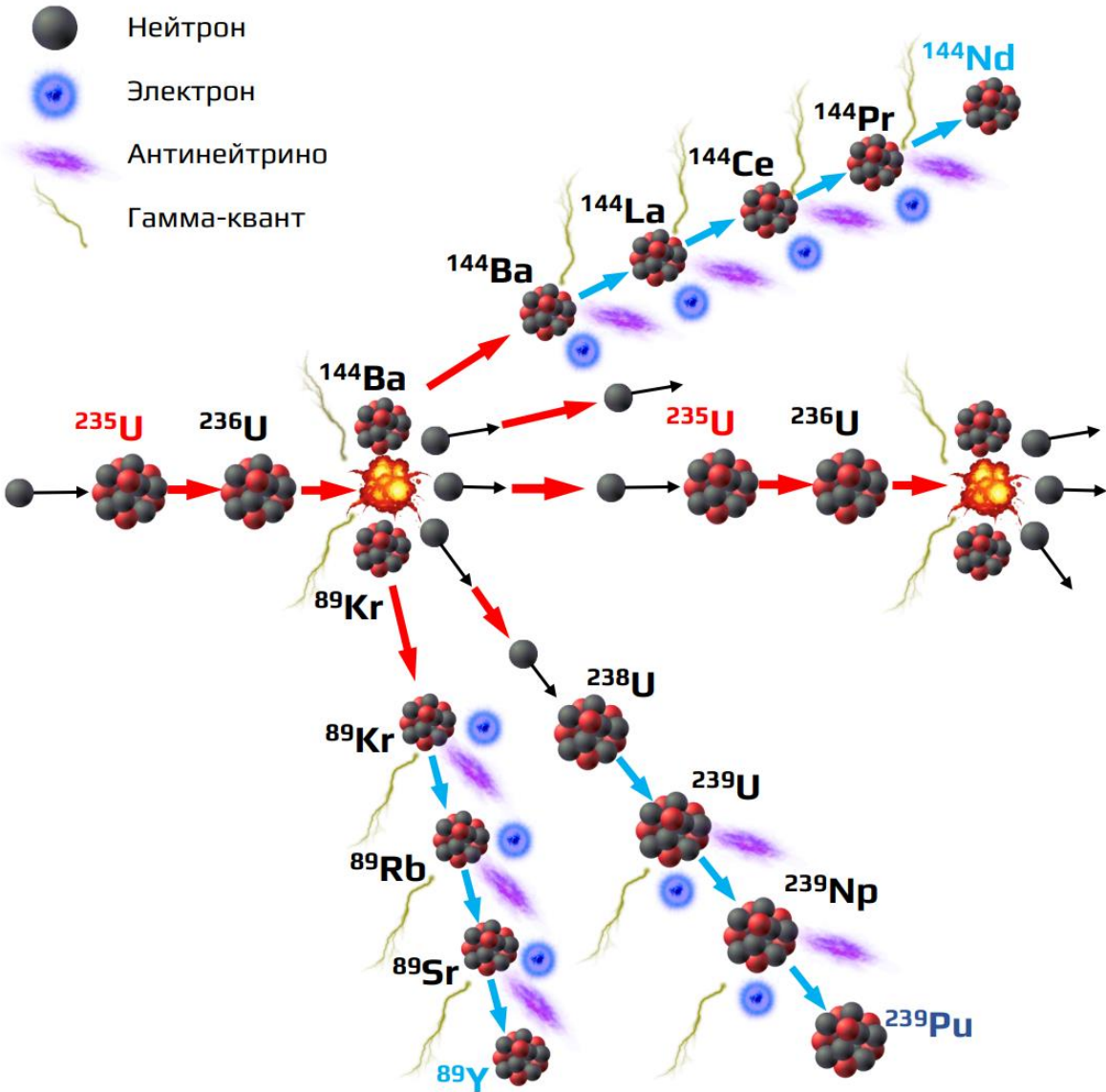
- $\Phi_\nu(E, R)$ – спектральная плотность потока антинейтрино на расстоянии R
- $N_f^{(i)}$ – число делений $i = 235, 238, 239, 241$ изотопа в единицу времени
- $\rho_\nu^{(i)}(E)$ – кумулятивный спектр антинейтрино
- P_{th} – тепловая мощность ядерного реактора
- $E_f^{(i)}$ – тепловая энергия деления



Скорость счета $\sim N_f \sim \frac{P_{\text{th}}}{E_f}$

1. Поиск новой физики (стерильные нейтрино, ...)
2. Прикладные приложения (определение P_{th} , ...)

Процесс деления в активной зоне



- $E_{\text{tot}}^{(i)}$ – полная энергия деления;
- $E_{\text{eff}}^{(i)} = E_{\text{tot}}^{(i)} - E_{\nu}^{(i)} - \Delta E_{\beta\gamma}^{(i)}$ – эффективная энергия деления;
- $E_f^{(i)} = E_{\text{eff}}^{(i)} + E_c^{(i)}$ – энергосвободное;
- $E_f = \sum \alpha_i E_f^{(i)}$ – среднее энергосвободное;

$$i = {}^{235}\text{U}, {}^{238}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu}$$

Расчет E_{tot}

Начальное
состояние
($t = 0$)

$$M(A, Z) + M_n = \sum Y(A_i, Z_i) M(A_i, Z_i) + \bar{\nu}_{pd} M_n + E_{\text{tot}}$$

Конечное
состояние
($t = \infty$)

$$E_{\text{tot}} = m(A, Z) - \sum Y(A_i, Z_i) m(A_i, Z_i) - (\bar{\nu}_{pd} - 1)m_n$$

| ИЗОТОП | Избыток массы делящегося ядра $m(A, Z)$ | Избыток массы стабильных продуктов деления $\sum Y(A_i, Z_i) m(A_i, Z_i)$ | Полный выход нейтронов $\bar{\nu}_{pd}$ | $(\bar{\nu}_{pd} - 1)m_n$ | Полная энергия деления E_{tot} , МэВ/дел |
|-------------------|---|--|---|---------------------------|---|
| ^{235}U | 40.9188 ± 0.0011 | -173.35 ± 0.05 | 2.436 ± 0.002 | 11.59 ± 0.02 | 202.68 ± 0.06 |
| ^{238}U | 40.3077 ± 0.0015 | -173.31 ± 0.10 | 2.82 ± 0.02 | 14.69 ± 0.16 | 205.93 ± 0.14 |
| ^{239}Pu | 48.5882 ± 0.0011 | -173.78 ± 0.07 | 2.883 ± 0.005 | 15.20 ± 0.04 | 207.17 ± 0.07 |
| ^{241}Pu | 52.9551 ± 0.0011 | -173.65 ± 0.10 | 2.948 ± 0.006 | 15.72 ± 0.04 | 210.88 ± 0.11 |

Расчет E_ν

$$E_\nu^{(i)} = \int_0^\infty \rho_\nu^{(i)}(E) E dE$$

~2 МэВ



Ab initio
BESTIOLE

Модель КИ

~8 МэВ



Ab initio
BESTIOLE

| ИЗОТОП | E_ν , МэВ/дел 2004 [4] | E_ν , МэВ/дел Настоящий расчет |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| ^{235}U | 9.07 ± 0.32 | 8.85 ± 0.25 |
| ^{238}U | 11.00 ± 0.80 | 11.40 ± 0.50 |
| ^{239}Pu | 7.22 ± 0.27 | 7.32 ± 0.20 |
| ^{241}Pu | 8.71 ± 0.30 | 8.90 ± 0.22 |

[1] В.И. Копейкин, Ю.Н. Панин, А.А. Сабельников, ЯФ **85** (2021)

[2] Д.В. Попов, М.Д. Скорохватов, Письма в ЭЧАЯ **20** (2023)

[3] L. Perisse et al., arXiv: 2304.14992v2 [nucl-ex] (2023)

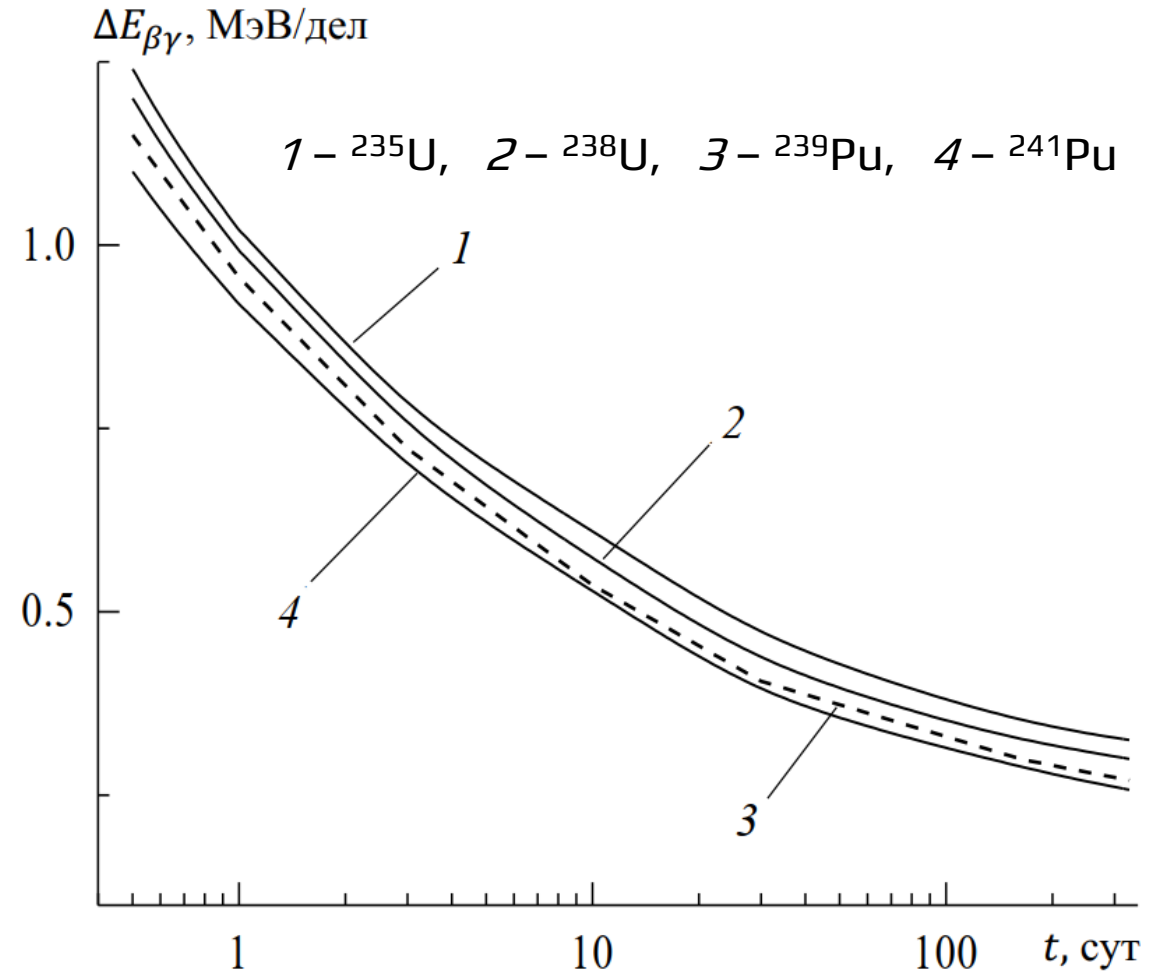
[4] В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, В. В. Синев, ЯФ **67** (2004)

Расчет $\Delta E_{\beta\gamma}(t)$

$$\Delta^{\text{fit}} E_{\beta\gamma}(t) = E_0 \exp(-\lambda_0 t^\alpha) + \epsilon$$

$0.5 < t < 500$ сут

| Делящееся ядро | E_0 , МэВ | λ_0 | α | ϵ , МэВ |
|-------------------|-------------|-------------|----------|------------------|
| ^{235}U | 8.80 | 2.15 | 0.108 | 0.185 |
| ^{238}U | 9.20 | 2.22 | 0.106 | 0.165 |
| ^{239}Pu | 8.50 | 2.18 | 0.109 | 0.155 |
| ^{241}Pu | 8.20 | 2.16 | 0.105 | 0.135 |



Расчет E_c

| Материал | E_{nc}^i , МэВ/нейтрон | Вероятность захвата нейтронов без деления, % | | |
|--|--------------------------|--|-----------------|-----------------|
| | | Момент кампании реактора | | |
| | | Начало (10 сут) | Середина | Конец |
| ^{235}U | 6.54 | 10.3 | 8.5 | 7.0 |
| ^{238}U | 5.72 | 40.4 | 40.2 | 40.2 |
| ^{239}Pu | 6.53 | 9.1 | 11.5 | 13.3 |
| ^{240}Pu | 5.24 | 6.0 | 7.6 | 9.3 |
| ^{241}Pu | 6.31 | 1.0 | 1.4 | 1.9 |
| Проч. тяж. элементы: ^{236}U , ^{237}Np , ^{242}Pu , ... | 5.43 | 1.6 | 2.4 | 3.0 |
| ^{135}Xe | 7.99 ^a | 3.4 | 3.4 | 3.4 |
| ^{149}Sm | 7.99 | 1.2 | 1.1 | 1.1 |
| Прочие продукты деления | 7.88 | 7.1 | 9.5 | 12.0 |
| Gd | 8.04 | 1.6 | 1.0 | 0.4 |
| Zr | 8.11 | 1.8 | 1.8 | 1.8 |
| ^{10}B | 2.79 | 10.2 | 5.3 | 0 |
| Вода | 2.22 | 5.7 | 5.8 | 6.1 |
| Прочие материалы: Nb, Hf, ... | 7.50 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| Активная зона реактора | E_{nc} , МэВ/нейтрон | 5.68 ± 0.12 | 5.86 ± 0.12 | 6.04 ± 0.12 |

$$E_c = (\bar{\nu}_{pd} - 1)E_{nc}$$

$$E_{nc} = \sum \eta_i E_{nc}^i, \text{ где}$$

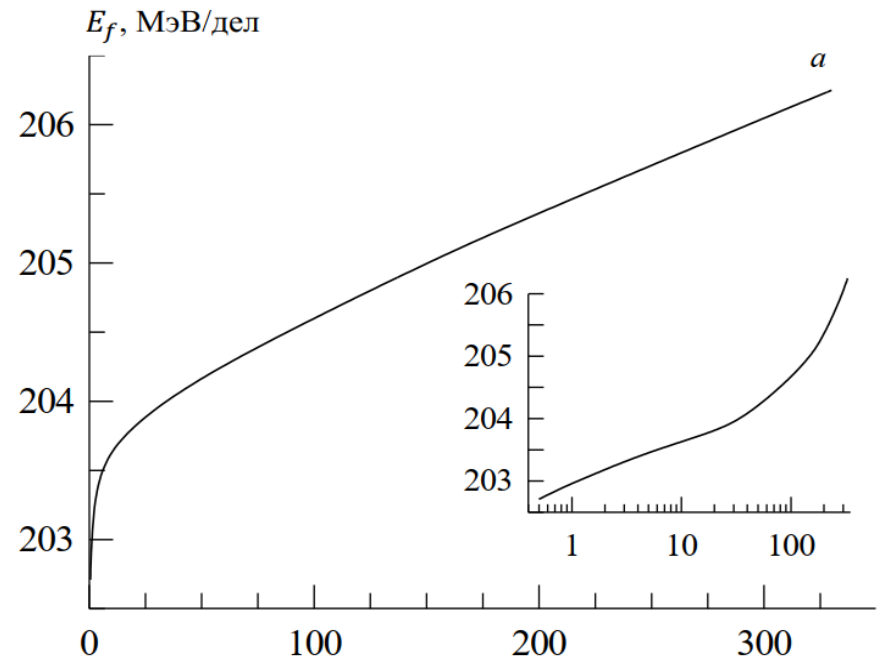
η_k – вероятность захвата нейтрона i -ым материалом

Для $t = 165$ сут

| Изотоп | 2004 [4] | Настоящий расчет |
|-------------------|------------------|------------------|
| ^{235}U | 8.55 ± 0.22 | 8.4 ± 0.2 |
| ^{238}U | 10.92 ± 0.28 | 10.7 ± 0.2 |
| ^{239}Pu | 11.19 ± 0.28 | 11.0 ± 0.2 |
| ^{241}Pu | 11.56 ± 0.29 | 11.4 ± 0.2 |

[4] В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, В. В. Синев, ЯФ **67** (2004)

Динамика энерговыделения



$$E_f(t) = \sum \alpha_i(t) \cdot \left(E_{\text{tot}}^{(i)} - E_{\nu}^{(i)} - \Delta E_{\beta\gamma}^{(i)}(t) + E_c^{(i)}(t) \right)$$

Динамика изотопного
состава ядерного
топлива

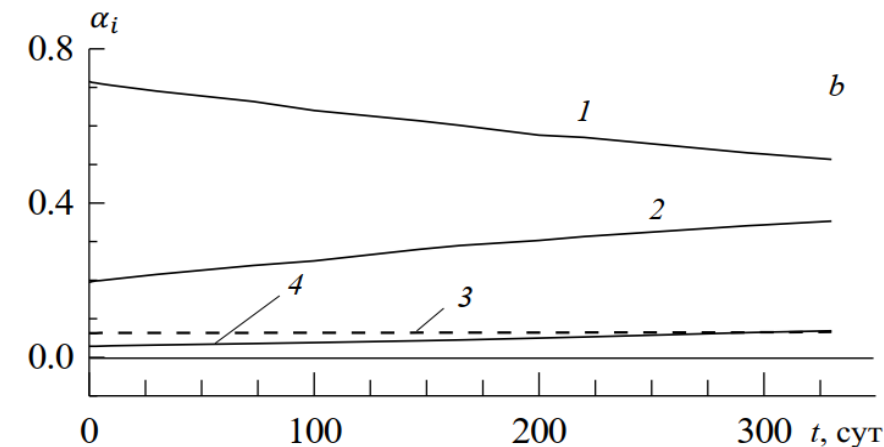
Задержанные распады
долгоживущих продуктов
деления

Изменение баланса
нейтронов в ходе
кампании

Для $t = 165$ сут

| Изотоп | 2004 [4] | Настоящий расчет |
|-------------------|-------------------|------------------|
| ^{235}U | 201.92 ± 0.46 | 201.9 ± 0.4 |
| ^{238}U | 205.52 ± 0.96 | 204.9 ± 0.5 |
| ^{239}Pu | 209.99 ± 0.60 | 210.6 ± 0.4 |
| ^{241}Pu | 213.60 ± 0.65 | 213.1 ± 0.5 |

[4] В. И. Копейкин, Л. А. Микаэлян, В. В. Синев, ЯФ **67** (2004)



Заключение

Рассчитаны значения тепловых энергий деления E_f для ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu в динамике на основании:

- Обновленных баз ядерных данных $\Rightarrow E_{\text{tot}}$
- Уточнении спектра реакторных антинейтрино $\Rightarrow E_\nu$
- Учета применения композитного состава топлива с гадолиниевым выгорающим поглотителем $\Rightarrow E_c$



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Динамика энерговыделения в активной зоне ядерного реактора

Благодарю за внимание!

Попов Даниэль Валерьевич
НИЦ «Курчатовский Институт»
НИЯУ МИФИ