

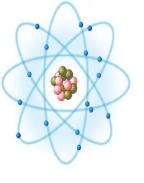
# Теория ядерных реакторов

Методические указания к курсовому проекту по спецкурсу  $\mathfrak{N}_{2}$  2

Докладчик Алексеенко Николай Николаевич

> к.ф.-м.н. доцент

08/31/2023



### Тема проекта

# РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОМОГЕННОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Состав активной зоны: графит и уран с отношением чисел ядер  $^{235}$ U/( $^{235}$ U+ $^{238}$ U)=0.15.

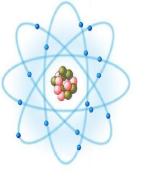
Состав отражателя - торий.

Исполнитель студент гр. Фт-490202

Иванов Пётр Сидорович





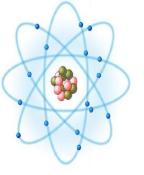


### Цель проекта

- 1. Неформальное изучение основных понятий теории ядерных реакторов.
- 2. Ознакомление с методами расчета реакторов.
- 3. Многогрупповой расчет критических параметров реактора заданной геометрии и состава.
- 4. Анализ полученных результатов.





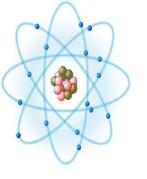


## План работы

- 1. Освежить в памяти лекции, по теории ядерных реакторов.
- 2. По лекциям и методичке изучить расчет критических параметров реактора методом Шихова-Новожилова.
- 3. В соответствии с заданием к курсовому проекту сделать «вручную» расчет критических параметров реактора без отражателя в нулевом приближении по 9-групповой системе констант.
- 4. Произвести расчеты согласно индивидуальному заданию по программе MSN. Изучить, полученные вручную и по программе, результаты и написать отчет.





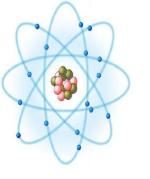


## План работы

- 5. Осмыслить полученные результаты и написать отчет в соответствии с ГОСТ 7.32-2001.
- 6. В отчете должны быть разделы: оглавление, введение, краткое описание методики расчета, результаты расчета, обсуждение результатов расчета, список использованных источников. Во введении нужно отразить существующие методы расчета реакторов и обосновать применение метода Шихова-Новожилова в курсовом проекте.
- 7. Подготовить презентацию работы и защитить проект.







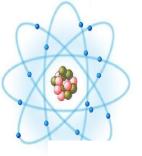
### 1. Подготовка ядерных констант

Для расчета используются 26-групповые ядерные константы, из книги Л.П. Абагян и др.

С целью детального изучения методики расчета в задании к проекту студентам предлагается сделать самостоятельно расчет критических параметров реактора сферической геометрии без отражателя (в нулевом приближении) по 9-групповой системе ядерных констант. Поэтому возникает необходимость перевода 26-групповых констант в 9-групповые.







### Таблица 26-групповых констант

Уран (U<sup>233</sup>)





# Связь между константами 26-групповой и 9-групповой систем

• 1-4:

• 5-7: 2

• 8-10: 3

• 11-13: 4

• 14-16: 5

• 17-19: 6

• 20-22: 7

• 23-25: 8

• 26 : 9

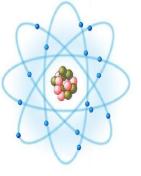
Для расчета констант 1-й группы 9групповой системы используются константы с 1-й по 4-ю группу 26групповой системы и т.д. Расчет констант выполняется по формуле

$$\sigma_{I} = \frac{1}{\Delta u_{I}} \sum_{k=1}^{4} \sigma_{ik} \Delta u_{ik} = \frac{\sigma_{I1} \Delta u_{I1} + \sigma_{I2} \Delta u_{I2} + \sigma_{I3} \Delta u_{I3} + \sigma_{I4} \Delta u_{I4}}{\Delta u_{I1} + \Delta u_{I2} + \Delta u_{I3} + \Delta u_{I4}}$$

Здесь слева микроскопическое сечение 1-й группы 9-групповой системы, а справа (в формуле) соответствующие сечения 26-групповой системы.





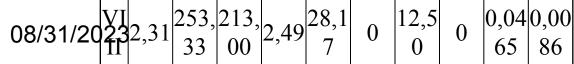


### Результат расчета

|     | <sup>233</sup> U: 9-групповые константы σ, барн |               |                |      |              |                  |                   |         |                  |            |  |  |
|-----|---|---------------|----------------|------|--------------|------------------|-------------------|---------|------------------|------------|--|--|
| i   | $\Delta U$                                      | $\sigma_{_t}$ | $\sigma_{\!f}$ | v    | $\sigma_{c}$ | $\sigma_{_{in}}$ | $\sigma_{_{\!e}}$ | $\mu_e$ | $\sigma_{3}$ (e) | υζ         |  |  |
| I   | 2,01  | 7,10          | 1,87           | 2,94 | 0,03         | 1,15             | 4,04              | 0,72    | 0,00<br>49       | 0,00<br>24 |  |  |
| II  | 1,95  | 7,80          | 2,10           | 2,54 | 0,13         | 0,64             | 4,93              | 0,34    | 0,01<br>22       | 0,00<br>48 |  |  |
| III | 2,23  | 12,0          | 2,92           | 2,49 | 0,41         | 0,13             | 8,56              | 0,08    | 0,03<br>04       | 0,00<br>79 |  |  |
| IV  | 2,31  | 17,6<br>0     | 6,30           | 2,49 | 1,35         | 0                | 9,93              | 0,01    | 0,03<br>66       | 0,00<br>85 |  |  |
| V   | 2,31  | 28,9<br>7     | 12,2<br>7      | 2,49 | 4,03         | 0                | 12,6<br>7         | 0       | 0,04<br>72       | 0,00<br>86 |  |  |
| VI  | 2 31  | 66,3          | 40,6           | 2 49 | 12,6         | 0                | 13,0              | 0       | 0,04             |            |  |  |
|     | I   | J             | /              | l    | /            | l                | U                 |         | 04               | UOU        |  |  |

По этому алгоритму вычисляются константы (за исключением сечения замедления) для всех члер, входящих в состав активной зоны реактора.





### Расчет сечения замедления

Сечение замедления нейтронов определенной группы зависит не только от эффективных сечений среды, но и от формы внутри-группового спектра, и от ширины группы. Поэтому, в отличие от других групповых констант, сечение замедления нейтронов может существенно изменяться в зависимости от формы группового спектра даже в том случае, если все элементарные сечения в пределах группы от энергии не зависят. Поэтому для расчета сечения замедления при упругом рассеянии используем предварительно рассчитанные 9-групповые константы упругого рассеяния и рассчитываем сечение замедления по формуле

 $\sigma_{_{3}}(e) = \frac{\xi \sigma_{_{e}}}{\Delta u} \cdot b ,$ 

где величины в правой части являются 9-групповыми, а величину b будем считать равной единице.





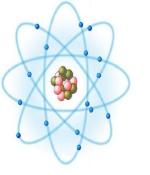
## Расчет микроскопических сечений матриц межгрупповых переходов

В таблицах Л.П. Абагян и др. эта матрица для  $^{233}$ U имеет вид

| i |      | 10   |      |      |      |        |      |      |      | Vis servi |
|---|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|-----------|
|   | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5      | 6    | 7    | 8    | 9         |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,16 | 0,28 | 0,34   | 0,20 | 0,08 | 0,03 | 0,01      |
| 2 | 0,01 | 0,06 | 0,23 | 0,42 | 0,41 | 0,22   | 0,09 | 0,03 | 0,01 | -         |
| 3 | 0,05 | 0,16 | 0,32 | 0,41 | 0,24 | 0,10   | 0,03 | 0,01 | -    | -         |
| 4 | 0,08 | 0,19 | 0,42 | 0,27 | 0,12 | 0,04   | 0,01 | -    | 1-   | -         |
| 5 | 0,20 | 0,33 | 0,22 | 0,10 | 0,04 | 0,01   | -    |      | -    | -         |
| 6 | 0,29 | 0,25 | 0,08 | 0,03 | 0,01 | -      | 1    | 1    | -    | -         |
| 7 | 0,23 | 0,12 | 0,03 | 0,02 | 7    |        | -    | -    | -    | -         |
| 8 | 0,17 | 0,12 | +    | 63.0 | -    | -      | -    | -    | -    | -         |
| 9 | 0.06 | 0,04 | 0,02 | 1    | -    | Paul ( | 1-4  | -    | -    | -         |





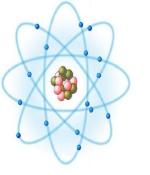


#### Матрица межгрупповых переходов

- В этой таблице содержатся сечения неупругого рассеяния нейтронов, в результате которого нейтрон, теряя энергию переходит из группы i в группу j. При этом  $i \le j$ .
- В первом столбце k=0, i=j находятся диагональные элементы матрицы.
- Диагональные элементы определяют вероятность того, что в результате неупругого рассеяния нейтрона на ядре <sup>233</sup>U энергия нейтрона останется в пределах той же группы, в которой он находился до рассеяния.







### Расчет 9-групповой матрицы рассеяния

Он проводится по формуле

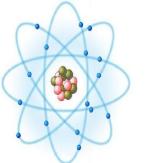
$$\sigma_{ii} = \frac{1}{\Delta u_i} \sum_{k=1}^{ni} \Delta u_{ik} \sum_{l=1}^{n} \sigma_{ii}^{kl}$$

Для расчета по этой формуле 26-групповую матрицу нужно представить в привычном виде, где поддиагональные элементы нулевые, а диагональные и наддиагональные могут отличаться от нуля.

После этого её нужно разделить на блоки в соответствии со следующим слайдом.



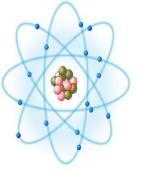




## Разбиение 26-групповой матрицы рассеяния на блоки

| $\sigma_{11}$ | $\sigma_{12}$ | $\sigma_{13}$ | $\sigma_{14}$ | $\sigma_{_{15}}$ | $\sigma_{16}$   | $\sigma_{_{17}}$       | σ <sub>18</sub>   | $\sigma_{_{19}}$ |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|-----------------|------------------------|-------------------|------------------|
|               | $\sigma_{22}$ | $\sigma_{23}$ | $\sigma_{24}$ | $\sigma_{_{25}}$ | 26              | $\sigma_{_{27}}$       | σ_28              | $\sigma_{_{29}}$ |
|               |               | $\sigma_{33}$ | $\sigma_{34}$ | $\sigma_{35}$    | $\sigma_{f_6}$  | $\sigma_{37}$          | σ <sub>38</sub> - | <u> 0</u>        |
|               |               | 11            | $\sigma_{44}$ | $\sigma_{_{45}}$ | σ <sub>46</sub> | JO <sub>47</sub>       | $\sigma_{48}$     | <del>0</del> 49  |
|               |               |               |               | $\sigma_{55}$    | σ <sub>56</sub> | $\sigma_{_{57}}$       | $\sigma_{_{58}}$  | $\sigma_{_{59}}$ |
|               |               |               |               |                  | $\sigma_{66}$   | <u>σ</u> <sub>67</sub> | 68                | $\sigma_{_{69}}$ |
|               |               |               |               |                  |                 | σ <sub>77</sub>        | 0/8               |                  |
|               |               |               |               |                  |                 |                        | $\sigma_{_{88}}$  | $\sigma_{_{89}}$ |





## Вычисление 9-групповой матрицы рассеяния

Расчет проводится по формуле, представленной на слайде 11. Развернём её для трёх элементов 9-групповой матрицы:

$$\sigma_{I,I}^{9} = \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{14})\Delta u_{1} + (\sigma_{22} + \sigma_{23} + \sigma_{24})\Delta u_{2} + (\sigma_{33} + \sigma_{34})\Delta u_{3} + \sigma_{44}\Delta u_{4}}{\Delta u_{1} + \Delta u_{2} + \Delta u_{3} + \Delta u_{4}} (3)$$

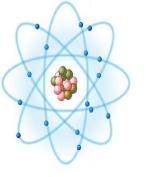
$$\sigma_{I,II}^{9} = \frac{(\sigma_{15} + \sigma_{16} + \sigma_{17})\Delta u_{1} + (\sigma_{25} + \sigma_{26} + \sigma_{27})\Delta u_{2} + (\sigma_{35} + \sigma_{36} + \sigma_{37})\Delta u_{3} + (\sigma_{45} + \sigma_{46} + \sigma_{47})\Delta u_{4}}{\Delta u_{1} + \Delta u_{2} + \Delta u_{3} + \Delta u_{4}} (3')$$

$$\sigma_{\text{II,II}}^{9} = \frac{(\sigma_{55} + \sigma_{56} + \sigma_{57})\Delta u_{5} + (\sigma_{66} + \sigma_{67})\Delta u_{6} + \sigma_{77}\Delta u_{7}}{\Delta u_{5} + \Delta u_{6} + \Delta u_{7}} (3'')$$

По этим формулам вычисляются матрицы рассеяния для всех ядер, входящих в состав активной зоны реактора.







### 2. Расчет макроскопических сечений

Макроскопическое сечение — это сумма произведений чисел ядер в единице объёма активной зоны (отражателя) на их микроскопические сечения.

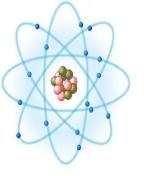
<u>Пример.</u> Пусть в активной зоне гомогенного реактора содержится <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U и <sup>12</sup>C. Требуется вычислить макроскопическое сечение полного взаимодействия нейтронов с ядрами. Это можно сделать по формуле

$$\Sigma_t = \sigma_t^8 N_8 + \sigma_t^5 N_5 + \sigma_t^c N_c \qquad (4)$$

Для расчета по формуле (4) необходимо определить числа ядер в единице объема в активной зоны и отражателя для всех элементов.







Согласно проектному заданию в составе активной зоны содержатся 3 компонента — делящийся элемент, сырьевой элемент и разбавитель (в частности — замедлитель). Поэтому, имеет смысл в расчет чисел ядер ввести величину обогащения топлива  $\beta$  по делящемуся компоненту и величину разбавления топлива  $\alpha$ .

$$\beta = \frac{N_1}{N_1 + N_2},$$
 (5)

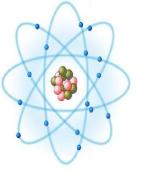
где

 $N_{\rm J}$  — число ядер делящегося компонента в единице объема среды ( $^{235}{
m U},\,^{233}{
m U}$  или Pu);

 $N_2$  - число ядер сырьевого компонента в единице объема среды ( $^{238}$ U,  $^{232}$ Th).







Из (5) следует, что

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\beta}{1 - \beta},\tag{6}$$

а разбавление, т.е. отношение числа ядер замедлителя к числу ядер горючего

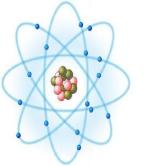
$$\alpha = \frac{N_{3}}{N_{2}} = \frac{N_{3}}{N_{1} + N_{2}}.$$
 (7)

Отсюда

$$\frac{N_{_{3}}}{N_{_{1}}} = \frac{\alpha}{\beta}.$$
 (8)







Объём, занимаемый всеми компонентами активной зоны в единице объёма смеси должен быть равен единице

$$V_1 + V_2 + V_3 = 1 (9)$$

ИЛИ

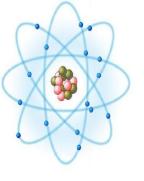
$$\frac{N_1}{N_0} \cdot \frac{A_1}{\rho_1} + \frac{N_2}{N_0} \cdot \frac{A_2}{\rho_2} + \frac{N_3}{N_0} \cdot \frac{A_3}{\rho_3} = 1, \qquad (10)$$

$$\frac{N_1}{N_0} \cdot \left( \frac{A_1}{\rho_1} + \frac{1 - \beta}{\beta} \cdot \frac{A_2}{\rho_2} + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{A_3}{\rho_3} \right) = 1. \tag{11}$$

Здесь  $N_0$  — число Авогадро;  $A_i$  и  $N_i$  — молярная масса и число ядер соответствующего компонента в единице объема.







$$N_{1} = \frac{N_{0}}{\frac{A_{1}}{\rho_{1}} + \frac{1 - \beta}{\beta} \cdot \frac{A_{2}}{\rho_{2}} + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{A_{3}}{\rho_{3}}}.$$
 (12)

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{1 - \beta}{\beta}. \tag{13}$$

$$N_3 = \alpha \cdot (N_1 + N_2). \tag{14}$$

Для расчета чисел ядер можно воспользоваться электронной таблицей (файл «Число\_ядер»).

Расчет макросечений проводится по формуле (4).





### Расчет других макроконстант

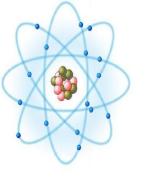
Для расчета *макросечения увода* в методичке имеется две формулы — (2.13) и (2.15). Следует пользоваться формулой (2.15). Если в состав реактора входит вода, то следует вычислять макроскопические матрицы упругого и неупругого рассеяния.

Для расчета элементов *9-группового спектра деления* применяется суммирование элементов 26-группового спектра. Например, для первой и второй групп 9-групповой системы констант можно записать

$$\chi_9^1 = \chi_{26}^1 + \chi_{26}^2 + \chi_{26}^3 + \chi_{26}^4,$$
  
$$\chi_9^2 = \chi_{26}^5 + \chi_{26}^6 + \chi_{26}^7.$$







### 4. Расчет потоков и ценностей

Потоки и ценности вычисляются по формулам (1.10) и (1.11) методички.

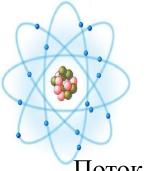
$$\Psi_{fa}^{j} \cdot \Sigma_{fa}^{j} + \sum_{l=j+1}^{m} \Sigma_{a}^{j \to l} \cdot \Phi_{a0}^{*l} \\
\Phi_{a0}^{*j} = \frac{\sum_{l=j+1}^{j} \Sigma_{a}^{j} \cdot \Phi_{a0}^{*l}}{\sum_{vea}^{j}}.$$
(1.11)

 $\chi_{a0}^{j}$  И  $V_{fa}^{j}$  - соответственно доля нейтронов j-й группы в спектре деления и число нейтронов, образующееся при делении.

Распишем эти формулы для трех начальных групп нейтронов. Поток для первой группы

$$\Phi_{a0}^1 = \frac{\chi_a^1}{\Sigma_{_{VBa}}^1}$$





### 4. Расчет потоков и ценностей

Поток для второй группы

$$\Phi_{a0}^{2} = \frac{\chi_{a}^{2} + \sum_{a}^{1 \to 2} \Phi_{a0}^{1}}{\sum_{vea}^{2}}.$$

Поток для третьей группы

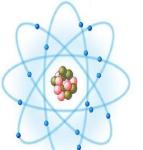
$$\Phi_{a0}^{3} = \frac{\chi_{a}^{3} + \sum_{a}^{1 \to 3} \Phi_{a0}^{1} + \sum_{a}^{2 \to 3} \Phi_{a0}^{2}}{\sum_{vea}^{2}}.$$

Расчет ценностей начинаем с последней группы

$$\Phi_{a0}^{*9} = \frac{v_{fa}^9 \cdot \sum_{fa}^9}{\sum_{yea}^9}.$$







### 4. Расчет потоков и ценностей

Ценность для восьмой группы

$$\Phi_{a0}^{*8} = \frac{\nu_{fa}^{8} \cdot \Sigma_{fa}^{8} + \Sigma_{a}^{8 \to 9} \cdot \Phi_{a0}^{*8}}{\Sigma_{vea}^{8}}.$$

Ценность для седьмой группы

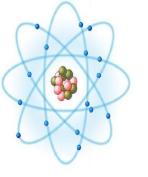
$$\Phi_{a0}^{*7} = \frac{v_{fa}^{7} \cdot \sum_{fa}^{7} + \sum_{a}^{7 \to 8} \cdot \Phi_{a0}^{*8} + \sum_{a}^{7 \to 9} \cdot \Phi_{a0}^{*9}}{\sum_{vea}^{7}}.$$

Важно отметить, что в сечения межгрупповых переходов, входящие в эти формулы, должны входить сечения замедления. Например,

$$\sum_{a}^{7\to8} = \sum_{in}^{78} + \sum_{3}^{7} (e).$$







# Расчет эффективных одногрупповых констант

Одногрупповые константы вычисляются по формулам (1.24), (1.25) и (1.26) из методички

$$D_{a} = \frac{\sum_{l=1}^{m} D_{a}^{l} \cdot \Phi_{a}^{l} \cdot \Phi_{a}^{*l}}{\sum_{l=1}^{m} \Phi_{a}^{l} \cdot \Phi_{a}^{*l}} \qquad \qquad \sum_{aa} = \frac{\sum_{j=1}^{m} \Phi_{a}^{*j} \cdot (\sum_{y \in a}^{j} \cdot \Phi_{a}^{j} - \sum_{l=1}^{j-1} \sum_{a}^{l \to j} \cdot \Phi_{a}^{l})}{\sum_{j=1}^{m} \Phi_{a}^{j} \cdot \Phi_{a}^{*j}}$$

$$v_{fa} \cdot \Sigma_{fa} = \frac{\sum_{j=1}^{m} \chi_{a}^{j} \cdot \Phi_{a}^{*j} \cdot \sum_{j=1}^{m} v_{fa}^{j} \cdot \Sigma_{fa}^{j} \cdot \Phi_{a}^{j}}{\sum_{j=1}^{m} \Phi_{a}^{j} \cdot \Phi_{a}^{*j}}$$







Критический радиус находим из условия равенства геометрического и материального параметров

$$\frac{\pi^2}{R_{\kappa p}^2} = \frac{v_{fa} \cdot \Sigma_{fa} - \Sigma_{aa}}{D_a}.$$



