

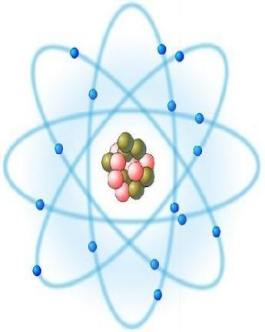


Уральский  
федеральный  
университет

# Теория ядерных реакторов

Методические указания к курсовому проекту  
по спецкурсу № 2

Докладчик  
**Алексенко**  
**Николай Николаевич**  
к.ф.-м.н.  
доцент



# Тема проекта

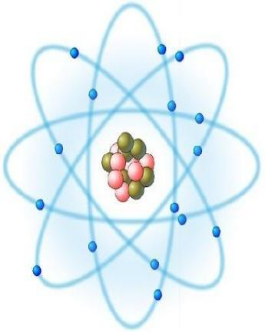
## РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОМОГЕННОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

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

Состав отражателя - торий.

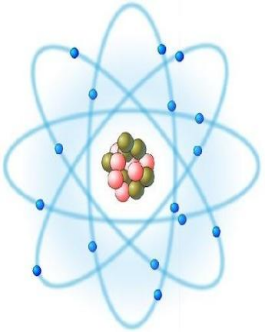
Исполнитель студент гр. ФТ-490202

Иванов Пётр Сидорович



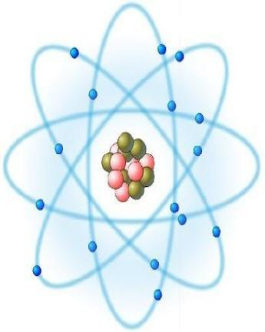
# Цель проекта

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.



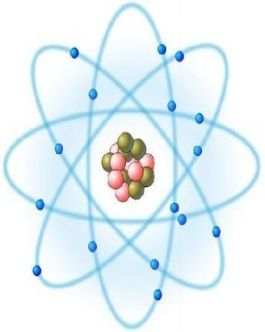
# План работы

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

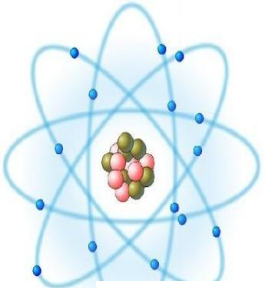
5. Осмыслить полученные результаты и написать отчет в соответствии с ГОСТ 7.32-2001.
6. В отчете должны быть разделы: оглавление, введение, краткое описание методики расчета, результаты расчета, обсуждение результатов расчета, список использованных источников. Во введении нужно отразить существующие 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 ( $U^{233}$ )

$i$	$E_n$	$\Delta u$	$\sigma_t$	$\sigma_f$	$\nu$	$\sigma_c$	$\sigma_{in}$	$\sigma_e$	$\mu_e$	$\epsilon$	$\sigma_{\Sigma} (e)$
1	6,5—10,5 МэВ	0,48	6,30	2,10	3,37	0,01	0,69	3,50	0,85	0,0013	0,023
2	4,0—6,5 МэВ	0,48	7,40	1,60	3,02	0,02	1,48	4,30	0,80	0,0017	0,025
3	2,5—4,0 МэВ	0,48	7,70	1,85	2,78	0,03	1,32	4,50	0,71	0,0025	0,028
4	1,4—2,5 МэВ	0,57	7,00	1,93	2,63	0,04	1,13	3,90	0,55	0,0039	0,027
5	0,8—1,4 МэВ	0,57	6,60	1,93	2,58	0,07	0,90	3,70	0,45	0,0047	0,030
6	0,4—0,8 МэВ	0,69	7,40	2,05	2,54	0,12	0,66	4,57	0,35	0,0056	0,037
7	0,2—0,4 МэВ	0,69	9,20	2,30	2,51	0,20	0,40	6,30	0,23	0,0066	0,060
8	0,1—0,2 МэВ	0,69	10,6	2,40	2,50	0,26	0,29	7,65	0,13	0,0075	0,083
9	46,5—100 кэВ	0,77	12,1	2,80	2,49	0,34	0,12	8,84	0,07	0,0080	0,092
10	21,5—46,5 кэВ	0,77	13,2	3,50	2,49	0,60	—	9,10	0,04	0,0082	0,097
11	10,0—21,5 кэВ	0,77	15,0	4,60	2,49	0,85	—	9,50	0,02	0,0084	0,104
12	4,65—10,0 кэВ	0,77	17,3	6,60	2,49	1,40	—	9,30	0,01	0,0085	0,103
13	2,15—4,65 кэВ	0,77	20,5	7,70	2,49	1,80	—	11,0	0,00	0,0086	0,123
14	1,0—2,15 кэВ	0,77	23,0	8,80	2,49	2,20	—	12,0	0,00	0,0086	0,134
15	465—1000 эВ	0,77	28,5	12	2,49	3,50	—	13,0	0,00	0,0086	0,145
16	215—465 эВ	0,77	35,4	16	2,49	6,40	—	13,0	0,00	0,0086	0,145
17	100—215 эВ	0,77	48	25	2,49	10,0	—	13,0	0,00	0,0086	0,145
18	46,5—100 эВ	0,77	57	32	2,49	12,0	—	13,0	0,00	0,0086	0,145
19	21,5—46,5 эВ	0,77	94	65	2,49	16,0	—	13,0	0,00	0,0086	0,145
20	10,0—21,5 эВ	0,77	154	110	2,49	31	—	13,0	0,00	0,0086	0,145
21	4,65—10,0 эВ	0,77	128	94	2,49	22	—	12,5	0,00	0,0086	0,140
22	2,15—4,65 эВ	0,77	177	126	2,49	39	—	12,5	0,00	0,0086	0,140
23	1,0—2,15 эВ	0,77	422	350	2,49	60	—	12,5	0,00	0,0086	0,140
24	0,465—1,0 эВ	0,77	147	124	2,49	10,5	—	12,5	0,00	0,0086	0,140
25	0,215—0,465 эВ	0,77	191	165	2,49	14	—	12,5	0,00	0,0086	0,140
$T$	0,0252 эВ	—	590	525	2,49	53	—	12,5	0,00	—	—



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

- 1-4: 1
- 5-7: 2
- 8-10: 3
- 11-13: 4
- 14-16: 5
- 17-19: 6
- 20-22: 7
- 23-25: 8
- 26 : 9

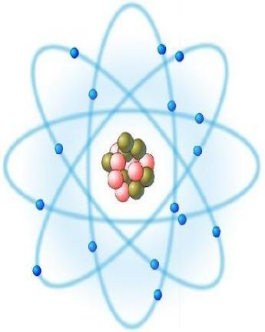
Для расчета констант 1-й группы 9-групповой системы используются константы с 1-й по 4-ю группу 26-групповой системы и т.д.

Расчет констант выполняется по формуле

$$\sigma_1 = \frac{1}{\Delta u_1} \sum_{k=1}^4 \sigma_{ik} \Delta u_{ik} = \frac{\sigma_{11} \Delta u_{11} + \sigma_{12} \Delta u_{12} + \sigma_{13} \Delta u_{13} + \sigma_{14} \Delta u_{14}}{\Delta u_{11} + \Delta u_{12} + \Delta u_{13} + \Delta u_{14}}$$

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





# Результат расчета

$^{233}\text{U}$ : 9-групповые константы $\sigma$ , барн										
$i$	$\Delta U$	$\sigma_t$	$\sigma_f$	$\nu$	$\sigma_c$	$\sigma_{in}$	$\sigma_e$	$\mu_e$	$\sigma_3$ (e)	$\xi$
I	2,01	7,10	1,87	2,94	0,03	1,15	4,04	0,72	0,00 49	0,00 24
II	1,95	7,80	2,10	2,54	0,13	0,64	4,93	0,34	0,01 22	0,00 48
III	2,23	12,0 2	2,92	2,49	0,41	0,13	8,56	0,08	0,03 04	0,00 79
IV	2,31	17,6 0	6,30	2,49	1,35	0	9,93	0,01	0,03 66	0,00 85
V	2,31	28,9 7	12,2 7	2,49	4,03	0	12,6 7	0	0,04 72	0,00 86
VI	2,31	66,3	40,6	2,49	12,6	0	13,0	0	0,04 84	0,00 80
VI	2,31	153,33	110,00	2,49	30,6 7	0	12,6 7	0	0,04 72	0,00 88

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

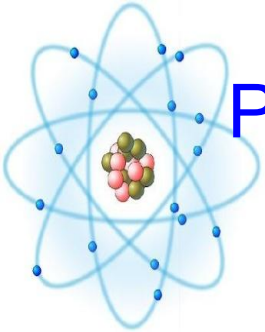


## Расчет сечения замедления

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

$$\sigma_3(e) = \frac{\xi \sigma_e}{\Delta u} \cdot b,$$

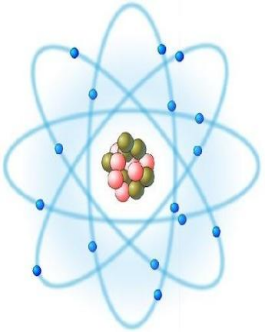
где величины в правой части являются 9-групповыми, а величину  $b$  будем считать равной единице.



# Расчет микроскопических сечений матриц межгрупповых переходов

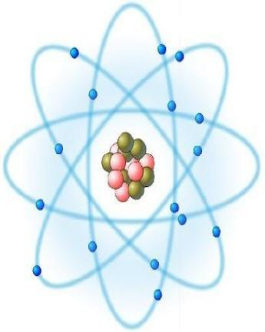
В таблицах Л.П. Абагян и др. эта матрица для  $^{233}\text{U}$  имеет вид

$i$	$\sigma_{in}(i, i+k)$ при $k$ , равном									
	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	—	—	—
5	0,20	0,33	0,22	0,10	0,04	0,01	—	—	—	—
6	0,29	0,25	0,08	0,03	0,01	—	—	—	—	—
7	0,23	0,12	0,03	0,02	—	—	—	—	—	—
8	0,17	0,12	—	—	—	—	—	—	—	—
9	0,06	0,04	0,02	—	—	—	—	—	—	—



## 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  $i \leq j$ .
- В первом столбце  $k=0$ ,  $i = j$  находятся диагональные элементы матрицы.
- Диагональные элементы определяют вероятность того, что в результате неупругого рассеяния нейтрона на ядре  $^{233}\text{U}$  энергия нейтрона останется в пределах той же группы, в которой он находился до рассеяния.



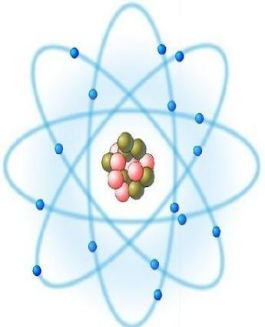
## Расчет 9-групповой матрицы рассеяния

Он проводится по формуле

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

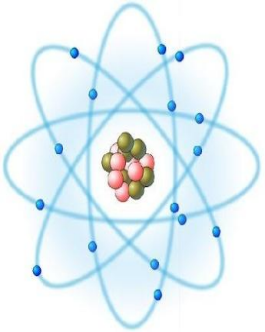
Для расчета по этой формуле 26-групповую матрицу нужно представить в привычном виде, где поддиагональные элементы нулевые, а диагональные и наддиагональные могут отличаться от нуля.

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



# Разбиение 26-групповой матрицы рассеяния на блоки

$\sigma_{11}$	$\sigma_{12}$	$\sigma_{13}$	$\sigma_{14}$	$\sigma_{15}$	$\sigma_{16}$	$\sigma_{17}$	$\sigma_{18}$	$\sigma_{19}$
	$\sigma_{22}$	$\sigma_{23}$	$\sigma_{24}$	$\sigma_{25}$	$\sigma_{26}$	$\sigma_{27}$	$\sigma_{28}$	$\sigma_{29}$
		$\sigma_{33}$	$\sigma_{34}$	$\sigma_{35}$	$\sigma_{36}$	$\sigma_{37}$	$\sigma_{38}$	$\sigma_{39}$
			$\sigma_{44}$	$\sigma_{45}$	$\sigma_{46}$	$\sigma_{47}$	$\sigma_{48}$	$\sigma_{49}$
				$\sigma_{55}$	$\sigma_{56}$	$\sigma_{57}$	$\sigma_{58}$	$\sigma_{59}$
					$\sigma_{66}$	$\sigma_{67}$	$\sigma_{68}$	$\sigma_{69}$
						$\sigma_{77}$	$\sigma_{78}$	$\sigma_{79}$
							$\sigma_{88}$	$\sigma_{89}$



# Вычисление 9-групповой матрицы рассеяния

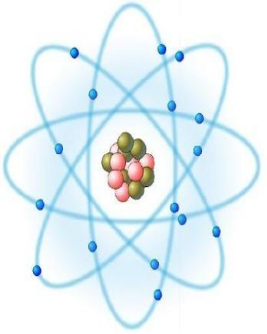
Расчет проводится по формуле, представленной на слайде 11.  
Развернём её для трёх элементов 9-групповой матрицы:

$$\sigma_{I,I}^9 = \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{14})\Delta u_1 + (\sigma_{22} + \sigma_{23} + \sigma_{24})\Delta u_2 + (\sigma_{33} + \sigma_{34})\Delta u_3 + \sigma_{44}\Delta u_4}{\Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3 + \Delta u_4} \quad (3)$$

$$\sigma_{I,II}^9 = \frac{(\sigma_{15} + \sigma_{16} + \sigma_{17})\Delta u_1 + (\sigma_{25} + \sigma_{26} + \sigma_{27})\Delta u_2 + (\sigma_{35} + \sigma_{36} + \sigma_{37})\Delta u_3 + (\sigma_{45} + \sigma_{46} + \sigma_{47})\Delta u_4}{\Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3 + \Delta u_4} \quad (3')$$

$$\sigma_{II,II}^9 = \frac{(\sigma_{55} + \sigma_{56} + \sigma_{57})\Delta u_5 + (\sigma_{66} + \sigma_{67})\Delta u_6 + \sigma_{77}\Delta u_7}{\Delta u_5 + \Delta u_6 + \Delta u_7} \quad (3'')$$

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



## 2. Расчет макроскопических сечений

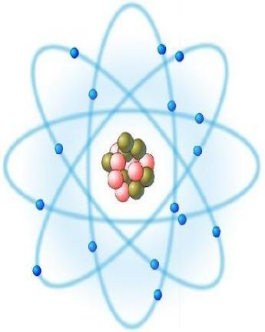
Макроскопическое сечение – это сумма произведений чисел ядер в единице объёма активной зоны (отражателя) на их микроскопические сечения.

Пример. Пусть в активной зоне гомогенного реактора содержится  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{12}\text{C}$ . Требуется вычислить макроскопическое сечение полного взаимодействия нейтронов с ядрами. Это можно сделать по формуле

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

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





### 3. Расчет числа ядер

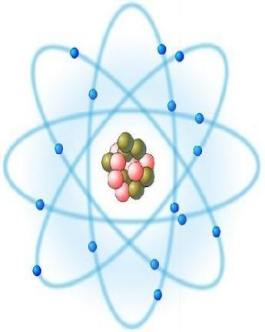
Согласно проектному заданию в составе активной зоны содержатся 3 компонента – делящийся элемент, сырьевой элемент и разбавитель (в частности – замедлитель). Поэтому, имеет смысл в расчет чисел ядер ввести величину обогащения топлива  $\beta$  по делящемуся компоненту и величину разбавления топлива  $\alpha$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

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

где

$N_1$  – число ядер делящегося компонента в единице объема среды ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  или Pu);

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



### 3. Расчет числа ядер

Из (5) следует, что

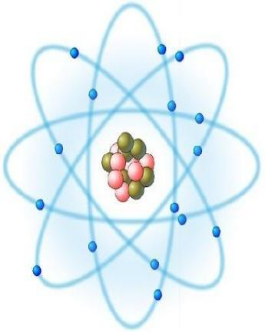
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\beta}{1 - \beta}, \quad (6)$$

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

$$\alpha = \frac{N_3}{N_2} = \frac{N_3}{N_1 + N_2}. \quad (7)$$

Отсюда

$$\frac{N_3}{N_1} = \frac{\alpha}{\beta}. \quad (8)$$



### 3. Расчет числа ядер

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

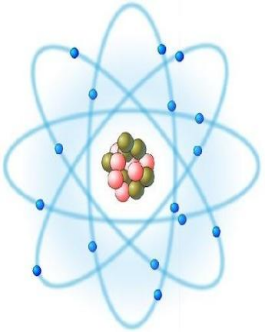
$$V_1 + V_2 + V_3 = 1 \quad (9)$$

или

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

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

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



### 3. Расчет числа ядер

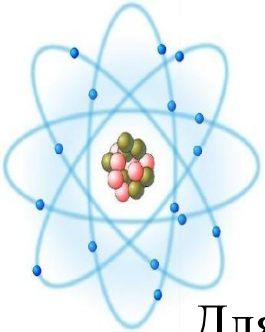
$$N_1 = \frac{N_0}{\frac{A_1}{\rho_1} + \frac{1-\beta}{\beta} \cdot \frac{A_2}{\rho_2} + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{A_3}{\rho_3}}. \quad (12)$$

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{1-\beta}{\beta}. \quad (13)$$

$$N_3 = \alpha \cdot (N_1 + N_2). \quad (14)$$

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

Расчет макросечений проводится по формуле (4).



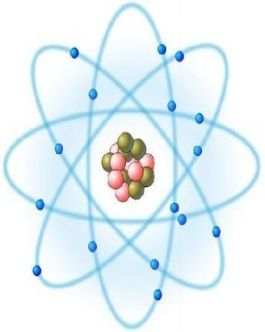
## Расчет других макроконстант

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.

$$\Phi_{a0}^j = \frac{\chi_0^j + \sum_{l=1}^{j-1} \Sigma_a^{l \rightarrow j} \cdot \Phi_{a0}^l}{\Sigma_{yva}^j}, \quad (1.10)$$

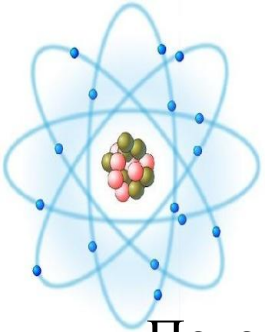
$$\Phi_{a0}^{*j} = \frac{\nu_{fa}^j \cdot \Sigma_{fa}^j + \sum_{l=j+1}^m \Sigma_a^{j \rightarrow l} \cdot \Phi_{a0}^{*l}}{\Sigma_{yva}^j}. \quad (1.11)$$

$\chi_{a0}^j$  и  $\nu_{fa}^j$  - 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

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



## 4. Расчет потоков и ценностей

Поток для второй группы

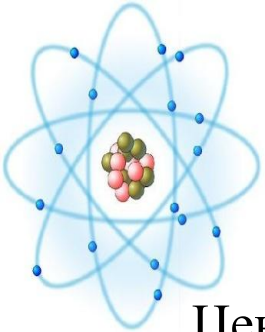
$$\Phi_{a0}^2 = \frac{\chi_a^2 + \sum_a^{1 \rightarrow 2} \Phi_{a0}^1}{\sum_{yva}^2}.$$

Поток для третьей группы

$$\Phi_{a0}^3 = \frac{\chi_a^3 + \sum_a^{1 \rightarrow 3} \Phi_{a0}^1 + \sum_a^{2 \rightarrow 3} \Phi_{a0}^2}{\sum_{yva}^3}.$$

Расчет ценностей начинаем с последней группы

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



## 4. Расчет потоков и ценностей

Ценность для восьмой группы

$$\Phi_{a0}^{*8} = \frac{\nu_{fa}^8 \cdot \Sigma_{fa}^8 + \Sigma_a^{8 \rightarrow 9} \cdot \Phi_{a0}^{*8}}{\Sigma_{uva}^8}.$$

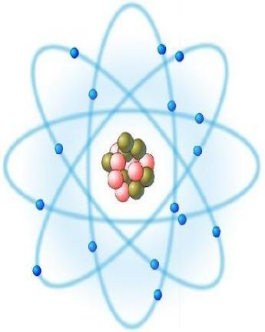
Ценность для седьмой группы

$$\Phi_{a0}^{*7} = \frac{\nu_{fa}^7 \cdot \Sigma_{fa}^7 + \Sigma_a^{7 \rightarrow 8} \cdot \Phi_{a0}^{*8} + \Sigma_a^{7 \rightarrow 9} \cdot \Phi_{a0}^{*9}}{\Sigma_{uva}^7}.$$

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

$$\Sigma_a^{7 \rightarrow 8} = \Sigma_{in}^{78} + \Sigma_3^7(e).$$





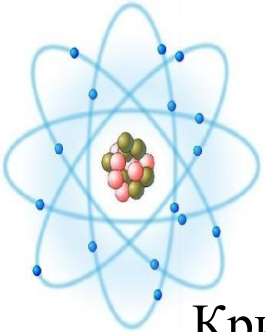
# Расчет эффективных одногогрупповых констант

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

$$D_a = \frac{\sum_{l=1}^m D_a^l \cdot \Phi_a^l \cdot \Phi_a^{*l}}{\sum_{l=1}^m \Phi_a^l \cdot \Phi_a^{*l}}$$

$$\Sigma_{aa} = \frac{\sum_{j=1}^m \Phi_a^{*j} \cdot (\Sigma_{yba}^j \cdot \Phi_a^j - \sum_{l=1}^{j-1} \Sigma_a^{l \rightarrow j} \cdot \Phi_a^l)}{\sum_{j=1}^m \Phi_a^j \cdot \Phi_a^{*j}}$$

$$v_{fa} \cdot \Sigma_{fa} = \frac{\sum_{j=1}^m \chi_a^j \cdot \Phi_a^{*j} \cdot \sum_{j=1}^m v_{fa}^j \cdot \Sigma_{fa}^j \cdot \Phi_a^j}{\sum_{j=1}^m \Phi_a^j \cdot \Phi_a^{*j}}$$



# Расчет критических параметров

Критический радиус находим из условия равенства геометрического и материального параметров

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