



[www.mephi.ru](http://www.mephi.ru)



# Ядерно-физические технологии и проблемы нераспространения

Колдобский Александр Борисович



# Литература по курсу «Ядерно-физические технологии и проблемы нераспространения»

## Основная литература

1. А. И. Абрамов. Основы ядерной физики. Энергоатомиздат, Москва, 1983.
2. К. Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. 1. Физика атомного ядра. Учебник для ВУЗов. Москва, Атомиздат, 1974.
3. А. Н. Климов. Ядерная физика и ядерные реакторы. Учебник для ВУЗов. Энергоатомиздат, Москва, 2002.
4. Л. В. Матвеев, А. П. Рудик. Почти всё о ядерном реакторе. М., Энергоатомиздат, 1990.
5. Ядерное нераспространение. Краткая энциклопедия. Гл. редактор А. В. Хлопков. М., РОССПЭН, 2009.
6. Инновационные направления современных международных отношений. Учебное пособие для студентов ВУЗов. Под ред. А. В. Крутских и А. В. Бирюкова. Аспект Пресс, М., 2010.



# Дополнительная литература по курсу «Ядерно-физические технологии и проблемы нераспространения»

## Ядерное оружие и проблемы нераспространения

1. А. Н. Шмелёв и др. Физические факторы и свойства ядерных материалов, влияющие на их защищённость. Москва, МИФИ, 2001.
2. Создание первой советской атомной бомбы. Под ред. В. Н. Михайлова. Москва, Энергоатомиздат, 1995.
3. Феоктистов Л. П. Из прошлого в будущее. Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, 1998.
4. А. Б. Колдобский и др. Сравнительный анализ ядерных топливных циклов в контексте нераспространения оружия массового уничтожения. Препринт МИФИ 003-2006. МИФИ, М., 2006.
5. Г. М. Пшакин, Н. И. Гераскин, В. А. Апсэ и др. Ядерное нераспространение. МИФИ, М., 2004.
6. Ядерное нераспространение. Под ред. В. А. Орлова и Н. Н. Сокова. ПИР-Центр, М., 2000.



# Дополнительная литература по курсу «Ядерно-физические технологии и проблемы нераспространения»

## Атомная энергетика

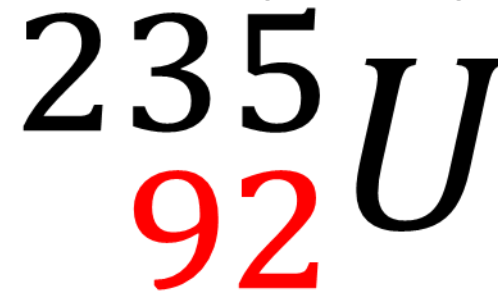
1. А. М. Петросьянц. Ядерная энергетика. «Наука», М., 1981.
2. Справочник по ядерной энерготехнологии. Под ред. В. А. Легасова. М., Энергоатомиздат, 1989.
3. Ю. А. Коровин, В. М. Муругов. Современные проблемы ядерной энергетике. ОБГТУ АЭ, Обнинск, 2006.
4. Асмолов В.Г. и др. Атомная энергетика. Оценки прошлого, реалии настоящего, ожидания будущего. М., ИздАт, 2004.
5. А. Б. Колдобский. 50 вопросов и ответов об атомной энергетике и ядерном топливе. «Атомпресса», М., 2006.





# Общепринятая символика

- Пример



Число  
нуклонов  
(A)

СИМВОЛ  
(Z)

Число  
протонов  
(Z)

- **Изотопы** – ядра (нуклиды) с одинаковым Z (количеством протонов в ядре), но разными количествами нейтронов и, как следствие, разными A.



## Классификация ядер по их стабильности (устойчивости состава во времени)

- **Стабильные ядра** – сохраняют нуклонный состав в течение неограниченно долгого времени
- **Нестабильные (радиоактивные) ядра (радионуклиды)** – изменяют со временем нуклонный состав строго индивидуальным образом для каждого ядра



## Классификация ядер по их стабильности (устойчивости состава во времени)

- **Условно-существующие системы (составные ядра)** – возникает в ходе ядерных реакций в возбуждённом состоянии и распадаются с эмиссией вторичных частиц за время, меньшее  $10^{-16}$  секунд



Свойство, параметр	Атом	Атомное ядро (нуклид)
Масса $m_H \approx 1,67 \cdot 10^{-24}$ г $m_e \approx 0,91 \cdot 10^{-27}$ г	Практически совпадает, поскольку $m_e \ll m_H$ (почти вся масса сосредоточена в ядре)	
Заряд	Электронейтрален, положительный заряд ядра численно равен суммарному отрицательному заряду электронов в оболочке	Положителен, общий заряд равен сумме единичных зарядов протонов
Расстояние $\text{Å} = 10^{-8}$ см $\Phi = 10^{-13}$ см	Единицы ангстрем (Å). Первый борковский радиус для атома водорода – 0,529Å. Размер молекулы воды ~ 2Å	Единицы – десятки ферми (ф). Радиус нуклона - $r_0 \approx 1,4\Phi$ , Радиус нуклона – $r = r_0 \cdot A^{1/3}$ где A – количество нуклонов в ядре
Энергия $1 \text{ эВ} = 10^{-12}$ эрг $1 \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. $1 \text{ МэВ} = 10^6$ эВ	Внешние электроны – единицы и десятки эВ. Внутренние электроны средних и тяжёлых атомов – единицы и десятки кэВ	Для всех нуклонов ядра $\frac{E_{\text{св}}}{A} = 8 \text{ МэВ}$





# Массы нуклонов и ядер

Элемент	Протонов Z	Нейтронов N	Всего: A=Z+N	Масса ядра, M <sub>я</sub> , эксп.
<sup>12</sup> C	6	6	12	12,000000
p	1	0	1	1,007276
n	0	1	1	1,008665
<sup>20</sup> Ne	10	10	20	19,993849



*Свойства элементарных частиц* ~~8. Таблица элемен~~

Частица	Символ*	Масса, МэВ	Заряды					
			Q	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	B	
Фотон	$\gamma$	0	0	0	0	0	0	
Лептоны	Нейтрино	$\nu_e$ $\bar{\nu}_e$	0	0	+1	0	0	0
		$\nu_\mu$ $\bar{\nu}_\mu$	0	0	0	+1	0	0
		$\nu_\tau$ $\bar{\nu}_\tau$	0	0	0	0	+1	0
	Электрон	$e^-$ $e^+$	0,511	-1	+1	0	0	0
	Мюон	$\mu^-$ $\mu^+$	105,66	-1	0	+1	0	0
Таон	$\tau^-$ $\tau^+$	1782	-1	0	0	+1	0	
Мезоны	Пи-мезоны	$\pi^+$ $\pi^0$	135,0	0		0	0	0
		$\pi^-$	139,6	+1		0	0	0
	Ка-мезоны	$K^+$ $K^-$	493,8	+1		0	0	0
		$K^0$ $\bar{K}^0$	497,8	0		0	0	0
Эта-мезон	$\eta$	549	0		0	0	0	
Фи-мезон	$\phi$	1019	0		0	0	0	
Барионы	Протон	$p$ $\bar{p}$	938,26	+1		0		+1
	Нейтрон	$n$ $\bar{n}$	939,55	0		0		+1
	Лямбда-гиперон	$\Lambda^0$ $\bar{\Lambda}^0$	1115,6	0		0		+1
		$\Sigma^+$ $\Sigma^-$	1189,4	+1		0		+1
		$\Sigma^0$ $\Sigma^0$	2292	0		0		+1
	Сигма-гипероны	$\Sigma^-$ $\Sigma^+$	1197,4	-1		0		+1
		$\Xi^0$ $\Xi^0$	1314,9	0		0		+1
Кси-гипероны	$\Xi^-$ $\Xi^+$	1321,3	-1		0		+1	
Омега-гиперон	$\Omega^-$ $\bar{\Omega}^+$	1675	-1		0		+1	

\* Справа указаны символы соответствующих античастиц.



# Фундаментальные взаимодействия и их константы

Взаимодействие	Относительная интенсивность	Радиус действия, см
Сильное (ядерное)	1	$10^{-13}$
Электромагнитное	$10^{-2}$	$\infty$
Слабое	$10^{-14}$	$10^{-16}$
Гравитационное	$10^{-31}$	$\infty$



# Энергия связи ядер и ядерная энергия

$$\cancel{c^2 * m_H * (A_1 + A_2)} - c^2 * [(\Delta M_{\text{я}})_1 + (\Delta M_{\text{я}})_2] =$$

~~(1) и (2) «россыпью»~~

$$= \cancel{c^2 * m_H * (A_3 + A_4)} - c^2 * [(\Delta M_{\text{я}})_3 + (\Delta M_{\text{я}})_4] + \mathbf{E}$$

~~(3) и (4) «россыпью»~~

Слагаемое **E** возникает из-за неравенства сумм энергий связи ядер до и после реакции.



# Энергия связи ядер и ядерная энергия

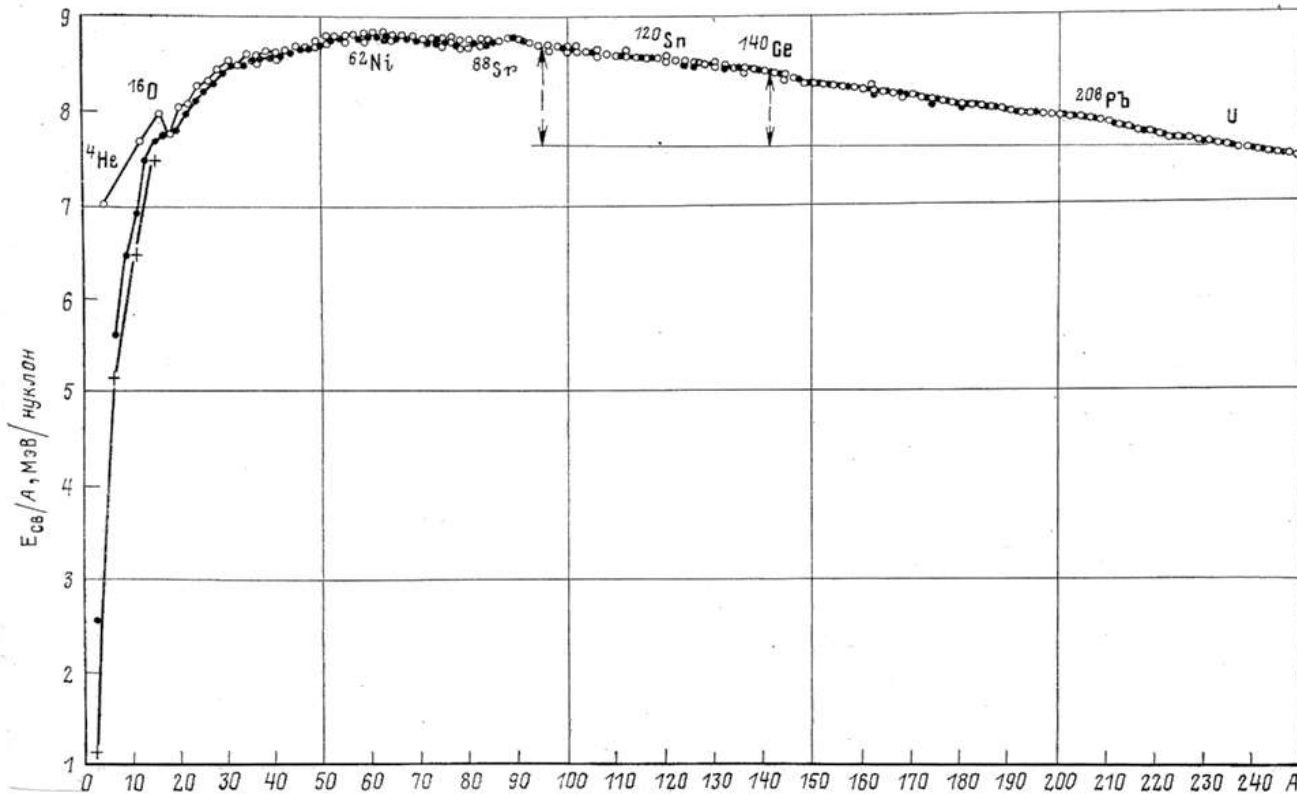
1. Если в реакцию вступают «рыхлые» ядра, а образуются «крепкие», то  $E$  – положительна ( $E > 0$ ), энергия выделяется.
2. Наоборот – отрицательна ( $E < 0$ ), энергия затрачивается.

Если мы хотим получить энергию, а не потратить ее, нам нужен первый случай.





# Энергия связи ядер и ядерная энергия



- Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре  $E_{св}/A$  в зависимости от массового числа  $A$



# Полуэмпирическая формула Бете-Вайцзекера для масс и энергий связи ядра

$$E_{\text{св}} = \underbrace{\alpha A - \beta A^{2/3}}_{\text{«Объёмное» слагаемое}} - \underbrace{\gamma \frac{z(z-1)}{A^{1/3}}}_{\text{Кулоновское слагаемое}} - \underbrace{\xi \frac{(A/2 - Z)^2}{A}}_{\text{Симметрическое слагаемое}} + \underbrace{\delta A^{-3/4}}_{\text{Чётно-нечётный эффект}} + \underbrace{\mu}_{\text{Эффект магичности}}$$

Вариативная часть

Жидкокапельная часть

$$\delta = \begin{cases} +|\delta| \text{ для чётно – чётных ядер} \\ 0 \text{ для нечётных } A \\ -|\delta| \text{ для нечётно – нечётных ядер} \end{cases}$$

Магические числа (по Z и N):  
2, 8, 20, 50, 82, 126 (по N)

$\alpha, \beta, \gamma, \xi, \delta, \mu$  – эмпирические константы (размерность – МэВ)

