

## 2. ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАНА

### 2.1 Природные изотопы урана

Уран стабильных изотопов не имеет, но известно 33 его радиоактивных изотопа. Природный уран состоит из трёх радиоактивных изотопов:  $^{238}\text{U}$  (99,2739%,  $T=4.47 \cdot 10^9$  лет,  $\alpha$ -излучатель, родоначальник радиоактивного ряда ( $4n+2$ )),  $^{235}\text{U}$  (0.7205%,  $T=7,04 \cdot 10^8$  лет, родоначальник радиоактивного ряда ( $4n+3$ )) и  $^{234}\text{U}$  (0.0056%,  $T=2.48 \cdot 10^5$  лет,  $\alpha$ -излучатель). Последний изотоп является не первичным, а радиогенным, он входит в состав радиоактивного ряда  $^{238}\text{U}$ . Атомная масса природного урана  $238,0289 \pm 0,0001$ . Радиоактивность природного урана обусловлена в основном изотопами  $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ , в равновесии их удельные активности равны. Удельная радиоактивность природного урана 0.67 микрокюри/г, разделяется практически пополам между  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ ;  $^{235}\text{U}$  вносит малый вклад (удельная активность изотопа  $^{235}\text{U}$  в природном уране в 21 раз меньше активности  $^{238}\text{U}$ ). Природный уран достаточно радиоактивен для засвечивания фотопластинок за время около часа. Поперечное сечение захвата тепловых нейтронов  $^{233}\text{U}$   $4,6 \cdot 10^{-27}$  м<sup>2</sup>,  $^{235}\text{U}$   $9,8 \cdot 10^{-27}$  м<sup>2</sup>,  $^{238}\text{U}$   $2,7 \cdot 10^{-28}$  м<sup>2</sup>; сечение деления  $^{233}\text{U}$   $5,27 \cdot 10^{-26}$  м<sup>2</sup>,  $^{235}\text{U}$   $5,84 \cdot 10^{-26}$  м<sup>2</sup>, природной смеси изотопов  $4,2 \cdot 10^{-28}$  м<sup>2</sup>.

Изотопы урана, как правило,  $\alpha$ -излучатели. Средняя энергия  $\alpha$ -излучения  $^{230}\text{U}$ ,  $^{231}\text{U}$ ,  $^{232}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  равна соответственно 5,97;  $3,05 \cdot 10^{-4}$ ; 5,414; 4,909; 4,859; 4,679; 4,572; 4,270 МэВ. В тоже время такие изотопы, как  $^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{239}\text{U}$  помимо альфа- испытывают и другой тип распада – спонтанное деление, хотя вероятность деления намного меньше вероятности  $\alpha$ -распада. В Табл. 1 в качестве примера приведены некоторые сведения по спонтанному делению урана-235 и урана-238 (для сравнения даны два изотопа плутония).

Табл. 1. Особенности спонтанного деления изотопов урана и плутония.

Ядро	Период полураспада	Вероятность деления на распад (%)	Число нейтронов на одно деление	Интенсивность, нейтроны/г-сек
$^{235}\text{U}$	$7.04 \cdot 10^8$ лет	$7.0 \cdot 10^{-9}$	1.86	$1.0 \cdot 10^{-5}$
$^{238}\text{U}$	$4.47 \cdot 10^9$ лет	$5.4 \cdot 10^{-5}$	2.07	0.0136
$^{239}\text{Pu}$	$2.41 \cdot 10^4$ лет	$4.4 \cdot 10^{-10}$	2.16	$2.2 \cdot 10^{-2}$
$^{240}\text{Pu}$	6569 лет	$5.0 \cdot 10^{-6}$	2.21	920
$^{252}\text{Cf}$	2.638 лет	3.09	3.73	$2.3 \cdot 10^{12}$

Некоторые изотопы урана способны к **вынужденному делению** под действием нейтронов.

С точки зрения практических приложений важно, что природные изотопы  $^{233}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  делятся под действием как тепловых, так и быстрых нейтронов ( $^{235}\text{U}$  способен к спонтанному делению), а ядра  $^{238}\text{U}$  способны к делению только при захвате нейтронов с энергией более 1 МэВ. При захвате нейтронов с меньшей энергией ядра  $^{238}\text{U}$  превращаются сначала в ядра  $^{239}\text{U}$ , которые далее испытывают  $\beta$ -распад и переходят сначала в  $^{239}\text{Np}$ , а затем - в  $^{239}\text{Pu}$ , ядерные свойства которого близки к  $^{235}\text{U}$ . Эффективные сечения захвата тепловых нейтронов ядер  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  равны  $98 \cdot 10^{-28}$ ,  $683 \cdot 10^{-28}$  и  $2,7 \cdot 10^{-28}$  м<sup>2</sup> соответственно. Полное деление  $^{235}\text{U}$  приводит к выделению «теплого энергетического эквивалента»  $2 \cdot 10^7$  кВт.ч/кг.

$^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  являются родоначальниками двух радиоактивных рядов генетически связанных радионуклидов:  $4n+2$  и  $4n+3$ . В процессе распада изотоп  $^{238}\text{U}$  образует несколько радиоактивных элементов. Среди продуктов распада урана встречаются как короткоживущие изотопы ( $^{234}\text{Pa}$  -  $T=1,18$  мин), так и долгоживущие ( $^{230}\text{Th}$  -  $T=8 \cdot 10^4$  лет). Продукты распада урана испускают  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -кванты. Все элементы ряда – металлы, за исключением радиоактивного инертного газа – эманации ( $^{222}\text{Rn}$ -радон в ряду  $^{238}\text{U}$  и  $^{219}\text{Rn}$ -актинон в ряду  $^{235}\text{U}$ ). Конечным продуктом распада является стабильный изотоп свинца -  $^{206}\text{Pb}$  в ряду  $^{238}\text{U}$  и  $^{207}\text{Pb}$  в ряду  $^{235}\text{U}$ . Радиоактивные потомки эманаций именуются активным налетом. Активный налет может собираться на любой поверхности; особенно эффективно они оседают на отрицательно заряженных электродах. Изотопы радона делят ряды на специфические части. Начальные отрезки содержат наиболее долгоживущие члены рядов - изотопы элементов, расположенных в периодической системе после радона (Fr, Rn, Ac, Th, Pa, U). Конечные отрезки всех трех семейств сходны даже по внешней конфигурации. В них находятся наиболее короткоживущие продукты - изотопы свинца, висмута, полония, таллия и астата.

Многие изотопы второй части рядов способны распадаться двумя путями: определенная часть атомов изотопа распадается с испусканием  $\alpha$ -частиц, другая часть - с испусканием  $\beta$ -частиц, образуя так называемую «вилку». Распад вновь образовавшихся изотопов имеет противоположный характер: если изотоп возник в результате  $\alpha$ -распада, то он оказывается  $\beta$ -активным; изотоп, образовавшийся в результате  $\beta$ -распада,  $\alpha$ -активен. Благодаря такой закономерности эти продукты превращаются в один и тот же изотоп одного и того же элемента. Во всех природных семействах встречается такая последовательность типов распада, при которой за одним  $\alpha$ -распадом следуют два  $\beta$ -распада или наоборот. Альфа-распад уменьшает

заряд ядра на две единицы, два последующих  $\beta$ -распада увеличивают заряд на две единицы. Появляется новый изотоп первоначального элемента.

$4n+2$  цепочку распада обычно называют урановым рядом, он начинается с урана-238 и включает такие элементы как астат, висмут, свинец, полоний, протактиний, радий, радон, таллий и торий. Эти элементы присутствуют во всех объектах, содержащих уран.

**Табл. 2.** Элементы ураниевого ряда.

Нуклид	Историч название (корот)	Историч название (длинное)	Тип распада	Период полурасп	Энергия, МэВ	Продукт распада
$^{238}\text{U}$	U	Уран	$\alpha$	$4.468 \cdot 10^9$ л	4.270	$^{234}\text{Th}$
$^{234}\text{Th}$	UX <sub>1</sub>	Уран X1	$\beta^-$	24.10 д	0.273	$^{234}\text{Pa}$
$^{234}\text{Pa}$	UZ	Уран Z	$\beta^-$	6.70 ч	2.197	$^{234}\text{U}$
$^{234}\text{U}$	U <sub>II</sub>	Уран два	$\alpha$	245500 л	4.859	$^{230}\text{Th}$
$^{230}\text{Th}$	Io	Ионий	$\alpha$	75380 л	4.770	$^{226}\text{Ra}$
$^{226}\text{Ra}$	Ra	Радий	$\alpha$	1602 л	4.871	$^{222}\text{Rn}$
$^{222}\text{Rn}$	Rn	Радон	$\alpha$	3.8235 д	5.590	$^{218}\text{Po}$
$^{218}\text{Po}$	RaA	Радий A	$\alpha$ 99.98 % $\beta^-$ 0.02 %	3.10 мин	6.115 0.265	$^{214}\text{Pb}$ $^{218}\text{At}$
$^{218}\text{At}$			$\alpha$ 99.90 % $\beta^-$ 0.10 %	1.5 с	6.874 2.883	$^{214}\text{Bi}$ $^{218}\text{Rn}$
$^{218}\text{Rn}$			$\alpha$	35 мс	7.263	$^{214}\text{Po}$
$^{214}\text{Pb}$	RaB	Радий B	$\beta^-$	26.8 мин	1.024	$^{214}\text{Bi}$
$^{214}\text{Bi}$	RaC	Радий C	$\beta^-$ 99.98 % $\alpha$ 0.02 %	19.9 мин	3.272 5.617	$^{214}\text{Po}$ $^{210}\text{Tl}$
$^{214}\text{Po}$	RaC'	Радий C'	$\alpha$	0.1643 мс	7.883	$^{210}\text{Pb}$
$^{210}\text{Tl}$	RaC''	Радий C''	$\beta^-$	1.30 мин	5.484	$^{210}\text{Pb}$
$^{210}\text{Pb}$	RaD	Радий D	$\beta^-$	22.3 л	0.064	$^{210}\text{Bi}$
$^{210}\text{Bi}$	RaE	Радий E	$\beta^-$ 99.99987% $\alpha$ 0.00013%	5.013 д	1.426 5.982	$^{210}\text{Po}$ $^{206}\text{Tl}$
$^{210}\text{Po}$	RaF	Радий F	$\alpha$	138.376 д	5.407	$^{206}\text{Pb}$
$^{206}\text{Tl}$			$\beta^-$	4.199 мин	1.533	$^{206}\text{Pb}$
$^{206}\text{Pb}$			-	Стабильный	-	-

Среднее время жизни  $^{238}\text{U}$   $1,41 \cdot 10^{17}$  сек, поэтому 1 моль  $^{238}\text{U}$  испускает  $3 \cdot 10^6$   $\alpha$ -частиц в секунду, образуя такое же количество  $^{234}\text{Th}$ . В замкнутой системе после достижения равновесия, количества всех элементов, за исключением  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{238}\text{U}$  будут находиться в фиксированном отношении, медленно уменьшаясь во времени. Количество  $^{206}\text{Pb}$  увеличивается пропорционально увеличению  $^{238}\text{U}$ . Любой член цепочки распадается с одинаковой скоростью  $3 \cdot 10^6$  распадающихся ядер в секунду на моль  $^{238}\text{U}$ .

№ эле-мента	Эле-мент	Изо-то-пы					
		$^{238}\text{U}$ 4.47*10 <sup>9</sup> лет		$^{234}\text{U}$ 2.45*10 <sup>5</sup> лет			
92	U						
91	Pa	↓ α	$^{234}\text{Pa}$ 1.17 мин И.П.(0,3%) $^{234}\text{Pa}$ 6.75 часа	↖ β	↓ α		
90	Th	$^{234}\text{Th}$ 24.1 дня	↖ β	$^{230}\text{Th}$ 7.7*10 <sup>4</sup> лет			
89	Ac			↓			
88	Ra			$^{226}\text{Ra}$ 1600 лет			
87	Fr			↓			
86	Rn			$^{222}\text{Rn}$ 3.825 дня		$^{218}\text{Rn}$ 0.02 сек	
85	At			↓	$^{218}\text{At}$	↓	
84	Po			$^{218}\text{Po}$ 3.05 мин	↖	$^{214}\text{Po}$ 1.6*10 <sup>-4</sup> сек	$^{210}\text{Po}$ 138.38 дня
83	Bi			↓	$^{214}\text{Bi}$ 19,8 мин	↓	$^{210}\text{Bi}$ 5,01 дня 3,0*10 <sup>6</sup> лет
82	Pb			$^{214}\text{Pb}$ 26,8 мин	↖	$^{210}\text{Pb}$ 22,3 года	↓
81	Tl			$^{210}\text{Tl}$ 1.32 мин	↖	$^{206}\text{Tl}$ 4.19 мин	↖
							$^{206}\text{Pb}$ <u><u>        </u></u>

Рис. 4. Семейство урана-238

Среднее время жизни  $^{234}\text{Th}$   $3 \cdot 10^6$  сек, поэтому при равновесии 1 моль  $^{238}\text{U}$  содержит  $9 \cdot 10^{12}$  атомов  $^{234}\text{Th}$ , т.е.  $1,5 \cdot 10^{-11}$  моль (отношение двух периодов полураспада). Аналогично, в равновесии в закрытой системе количество каждого члена ряда, за исключением конечного – свинца, будут пропорциональны величинам их периодов полураспада.

После выделения чистого  $^{238}\text{U}$  равновесие в ряду при человеческой шкале времён устанавливается только в первых трёх членах цепочки. Поэтому 1 моль такого  $^{238}\text{U}$  выдаёт  $3 \cdot 10^6$  раз в сек одну  $\alpha$ -частицу, две  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -квант, что означает 6,7 МэВ или 3  $\mu\text{Ват}$ . Экстраполяция на  $2 \cdot 10^{17}$  сек даёт 600 ГДж общего энерговыделения в ходе установления радиоактивного равновесия первых трёх членов уранового ряда.

№ эле-мента	Эле-мент	И з о т о п ы			
92	U	$^{238}\text{U}$ 7,04·10 <sup>8</sup> лет			
91	Pa		$^{231}\text{Pa}$ 3,28·10 <sup>4</sup> лет		
90	Th	$^{231}\text{Th}$ 1,068 дня		$^{227}\text{Th}$ 72 дня	
89	Ac		$^{227}\text{Ac}$ 22 года		
88	Ra			$^{223}\text{Ra}$ 11,2 дня	
87	Fr		$^{223}\text{Fr}$ 21 мин		
86	Rn			$^{219}\text{Rn}$ 3,92 сек	
85	At		$^{219}\text{At}$ 0,9 мин		$^{215}\text{At}$ 10 <sup>-4</sup> сек
84	Po			$^{215}\text{Po}$ 1,83·10 <sup>-3</sup> сек	$^{211}\text{Po}$ 5·10 <sup>-3</sup> сек
83	Bi		$^{215}\text{Bi}$ 7,4 мин		$^{211}\text{Bi}$ 2,14 мин
82	Pb			$^{211}\text{Pb}$ 36,1 мин	$^{207}\text{Pb}$
81	Tl				$^{207}\text{Tl}$ 4,77 мин

Рис. 5. Семейство урана-235.

Табл. 3. Равновесное содержание изотопов (мг) на 1 тонну урана

Радиоактивное семейство	Изотоп	Период полураспада, T	Содержание
4n+2 Урановое $^{238}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	4,47·10 <sup>9</sup> лет	9,93·10 <sup>8</sup>
	$^{234}\text{U}$	2,45·10 <sup>5</sup> лет	5·10 <sup>4</sup>
	$^{230}\text{Th}$	7,70·10 <sup>4</sup> лет	1,78·10 <sup>4</sup>
	$^{226}\text{Ra}$	1600 лет	3,30·10 <sup>2</sup>
	$^{210}\text{Pb}$	22,30 лет	4,32
4n+3 Актиниевое $^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	7,04·10 <sup>8</sup> лет	7,06·10 <sup>6</sup>
	$^{231}\text{Pa}$	3,28·10 <sup>4</sup> лет	3,14·10 <sup>2</sup>
	$^{227}\text{Ac}$	21,77 года	0,21
	$^{223}\text{Ra}$	11,30 сут	2,90·10 <sup>-4</sup>

**Табл. 4.** Радиоактивность природных семейств ( $\Delta t=10^9$  лет)

Ряд	Материнский изотоп	Период установления равновесия	A, Бк/кг (МИ)
4n+2	$^{238}\text{U}$	$1 \times 10^7$ лет	$1.6 \times 10^8$
4n+3	$^{235}\text{U}$	$5 \times 10^6$ лет	$3.7 \times 10^8$

**Табл. 5.** Некоторые изотопы урана

Радио- нуклид	$T_{1/2}$	Тип распа да	Средняя энергия излучения, МэВ/Бк·с характери- стическое, $\gamma$ - и анни- гиляционное излучение	$\beta$ - излучение, конверсион- ные элек- троны и Оже	Дочерний радионуклид (выход)
$^{230}\text{U}$	20,8 сут	$\alpha$	$2,98 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$^{226}\text{Th}$ радиоакт.
$^{231}\text{U}$	4,2 сут	$3\beta; \alpha$	$8,20 \cdot 10^{-2}$	$7,06 \cdot 10^{-2}$	$^{231}\text{Pa}$ радиоакт. $^{227}\text{Th}$ радиоакт. ( $5.5 \cdot 10^{-5}$ )
$^{232}\text{U}$	72 года	$\alpha$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$^{228}\text{Th}$ радиоакт.
$^{233}\text{U}$	$1,585 \cdot 10^5$ лет	$\alpha$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-3}$	$^{229}\text{Th}$ радиоакт.
$^{234}\text{U}$	$2,445 \cdot 10^5$ лет	$\alpha$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$^{230}\text{Th}$ радиоакт.
$^{235}\text{U}$	$703,8 \cdot 10^6$ лет	$\alpha$	$1,54 \cdot 10^{-1}$	$4,80 \cdot 10^{-2}$	$^{231}\text{Th}$ радиоакт.
$^{236}\text{U}$	$2,3415 \cdot 10^7$ лет	$\alpha$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$^{232}\text{Th}$ радиоакт.
$^{237}\text{U}$	6,75 сут	$\beta^-$	$1,42 \cdot 10^{-1}$	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$^{237}\text{Np}$ радиоакт.
$^{238}\text{U}$	$4,468 \cdot 10^9$ лет	СД; $\alpha$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$^{234}\text{Th}$ радиоакт.
$^{239}\text{U}$	23,54 мин	$\beta^-$	$5,11 \cdot 10^{-2}$	$4,08 \cdot 10^{-1}$	$^{239}\text{Np}$ радиоакт.
$^{240}\text{U}$	14,1 ч	$\beta^-$	$7,61 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-1}$	$^{240\text{m}}\text{Np}$ радиоакт.

**Табл. 6.** Таблица изотопов урана.

nuclide symbol	Z(p)	N(n)	isotopic mass (u)	half-life	Nuclear spin	Representative Isotopic Composition (mole fraction)	range of natural variation (mole fraction)
	excitation energy						
$^{217}\text{U}$	92	125	217.02437(9)	26(14) ms [16(+21-6) ms]	1/2-		
$^{218}\text{U}$	92	126	218.02354(3)	6(5) ms	0+		
$^{219}\text{U}$	92	127	219.02492(6)	55(25) $\mu\text{s}$ [42(+34-13) $\mu\text{s}$ ]	9/2+		
$^{220}\text{U}$	92	128	220.02472(22)	60 ns	0+		
$^{221}\text{U}$	92	129	221.02640(11)	700 ns	9/2+		
$^{222}\text{U}$	92	130	222.02609(11)	1.4(7) $\mu\text{s}$ [1.0(+10-4) $\mu\text{s}$ ]	0+		
$^{223}\text{U}$	92	131	223.02774(8)	21(8) $\mu\text{s}$ [18(+10-5) $\mu\text{s}$ ]	7/2+		
$^{224}\text{U}$	92	132	224.027605(27)	940(270) $\mu\text{s}$	0+		
$^{225}\text{U}$	92	133	225.02939	61(4) ms	(5/2+)		
$^{226}\text{U}$	92	134	226.029339(14)	269(6) ms	0+		
$^{227}\text{U}$	92	135	227.031156(18)	1.1(1) min	(3/2+)		
$^{228}\text{U}$	92	136	228.031374(16)	9.1(2) min	0+		
$^{229}\text{U}$	92	137	229.033506(6)	58(3) min	(3/2+)		
$^{230}\text{U}$	92	138	230.033940(5)	20.8 d	0+		
$^{231}\text{U}$	92	139	231.036294(3)	4.2(1) d	(5/2)(+)		

<sup>232</sup> U	92	140	232.0371562(24)	68.9(4) y	0+		
<sup>233</sup> U	92	141	233.0396352(29)	1.592(2)×10 <sup>5</sup> y	5/2+		
<sup>234</sup> U	92	142	234.0409521(20)	2.455(6)×10 <sup>5</sup> y	0+	[0.000054(5)]	0.000050-0.000059
<sup>234m</sup> U			1421.32(10) keV	33.5(20) μs	6-		
<sup>235</sup> U	92	143	235.0439299(20)	7.04(1)×10 <sup>8</sup> y	7/2-	[0.007204(6)]	0.007198-0.007207
<sup>235m</sup> U			0.0765(4) keV	~26 min	1/2+		
<sup>236</sup> U	92	144	236.045568(2)	2.342(3)×10 <sup>7</sup> y	0+		
<sup>236m1</sup> U			1052.89(19) keV	100(4) ns	(4)-		
<sup>236m2</sup> U			2750(10) keV	120(2) ns	(0+)		
<sup>237</sup> U	92	145	237.0487302(20)	6.75(1) d	1/2+		
<sup>238</sup> U	92	146	238.0507882(20)	4.468(3)×10 <sup>9</sup> y	0+	[0.992742(10)]	0.992739-0.992752
<sup>238m</sup> U			2557.9(5) keV	280(6) ns	0+		
<sup>239</sup> U	92	147	239.0542933(21)	23.45(2) min	5/2+		
<sup>239m1</sup> U			20(20) keV	>250 ns	(5/2+)		
<sup>239m2</sup> U			133.7990(10) keV	780(40) ns	1/2+		
<sup>240</sup> U	92	148	240.056592(6)	14.1(1) h	0+		
<sup>241</sup> U	92	149	241.06033(32)	5 min	7/2+		
<sup>242</sup> U	92	150	242.06293(22)	16.8(5) min	0+		

## 2.2 Техногенные изотопы урана

В современных атомных реакторах нарабатываются 11 искусственных радиоактивных изотопов с массовыми числами от 227 до 240, из которых самый долгоживущий – <sup>233</sup>U (T = 1,62·10<sup>5</sup> лет); он получается при нейтронном облучении тория. Изотопы урана с массовым числом больше 240 в реакторах не успевают образоваться. Слишком мало времени жизни урана-240, и он распадается, не успев захватить нейтрон. Однако, в сверхмощных нейтронных потоках термоядерного взрыва ядро урана за миллионную долю секунды успевает захватить до 19 нейтронов. При этом рождаются изотопы урана с массовыми числами от 239 до 257. Об их существовании узнали по появлению в продуктах термоядерного взрыва далеких трансурановых элементов – потомков тяжёлых изотопов урана. Сами «основатели рода» слишком неустойчивы к β-распаду и переходят в высшие элементы задолго до извлечения продуктов ядерных реакций из перемешанной взрывом породы.

**Табл. 7.** Ядерно-физические свойства <sup>239</sup>Pu и <sup>235</sup>U.

Изотоп	σ <sub>тепл</sub> (барн)	σ <sub>быстр</sub> (барн)	Число нейтронов на акт деления
<sup>239</sup> Pu	742,5	1,8	2,871
<sup>235</sup> U	582,2	2,0	2,418

В энергетических реакторах на тепловых нейтронах качестве ядерного топлива используют изотопы <sup>235</sup>U и <sup>233</sup>U, а в реакторах на быстрых нейтронах <sup>238</sup>U, т.е. изотопы, способные поддерживать цепную реакцию деления.

**Табл.8** демонстрирует эффективность захвата нейтронов основными изотопами урана.

**Табл.8** Захват нейтронов <sup>235</sup>U и <sup>238</sup>U

	<sup>238</sup> U	<sup>235</sup> U
Скорость нейтронов		
Быстрые нейтроны, энергия (>1 МэВ)	Происходит деление, захват маловероятен	Происходит деление, захват маловероятен
Промежуточные нейтроны, энергия (<10 эВ)	Происходит захват <sup>238</sup> U + n → <sup>239</sup> U	Захват маловероятен
Тепловые нейтроны, энергия (< 0.5 эВ)	Захват происходит очень редко (если происходит, образуется <sup>239</sup> U)	Происходит захват, ведущий к делению

**Табл. 9.** Радиохимическая характеристика изотопов урана

Массовое число	Тип превращения	Энергия, Мэв	Период полураспада
234	α	Природные изотопы	
		4,736(74%)	2,48·10 <sup>5</sup> лет
		4,716(26%)	

235	$\alpha$	4,58(10%)	$7,13 \cdot 10^8$ лет
		4,47(~3%)	
		4,40(83%)	
		4,20(4%)	
238	$\alpha$	4,18	$4,49 \cdot 10^9$ лет
Искусственные изотопы			
227	$\alpha$	6,8	1,3 мин
228	$\alpha(80\%)$	6,67	9,3 мин
электронный захват			
	(20%)		
229	$\alpha(20\%)$	6,42	58 мин
электронный захват			
	(80%)		
230	$\alpha$	5,85	20,8 суток
231	$\alpha(0,0055\%)$	5,45	4,2 суток
электронный захват			
	(>99%)		
232	$\alpha$	5,31(69%)	70 лет
		5,27(31%)	
233	$\alpha$	4,823	$1,62 \cdot 10^5$ лет
236	$\alpha$	4,499	$2,39 \cdot 10^7$ лет
237	$\beta^-, \gamma$	0,245	6,75 суток
239	$\beta^-$	1,21	23,54 мин
240	$\beta^-$	0,36	14 $\pm$ 1 час

#### Радиохимическая характеристика изотопов урана

**Табл.10 .** Изотопы урана, используемые в препаративной практике.

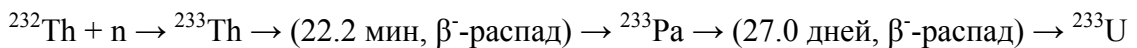
Радионуклид	Период полураспада, лет	Излучение	Удельная активность Ки/г	Удельная активность расп./(мин·мкг)
$^{232}\text{U}$	74	$\alpha, \gamma$	20,8	$4,6 \cdot 10^7$
$^{233}\text{U}$	$1,62 \cdot 10^5$	$\alpha$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^4$
$^{234}\text{U}$	$2,475 \cdot 10^5$	$\alpha$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^4$
$^{235}\text{U}$	$7,13 \cdot 10^8$	$\alpha$	$2,14 \cdot 10^{-5}$	4,8
$^{236}\text{U}$	$2,391 \cdot 10^7$	$\alpha$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^2$
$^{238}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$	$\alpha$	$3,33 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^{-1}$

Рассмотрим теперь ядерно-физические свойства некоторых изотопов урана.

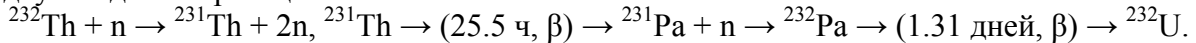
### 2.3 Некоторые изотопы урана

#### ***U-232.***

$^{232}\text{U}$  – техногенный нуклид, в природе не встречается,  $\alpha$ -излучатель,  $T=68,9$  лет, материнские изотопы  $^{236}\text{Pu}(\alpha)$ ,  $^{232}\text{Np}(\beta^+)$  и  $^{232}\text{Pa}(\beta^-)$ , дочерний нуклид  $^{228}\text{Th}$ . Способен к спонтанному делению.  $^{232}\text{U}$  имеет интенсивность спонтанного деления 0.47 делений/с·кг. В ядерной индустрии  $^{232}\text{U}$  нарабатывается как побочный продукт при синтезе делящегося (оружейного) нуклида  $^{233}\text{U}$  в ториевом топливном цикле. При облучении  $^{232}\text{Th}$  происходит основная реакция:



и побочная двухстадийная реакция:



Наработка  $^{232}\text{U}$  в ходе двухстадийной реакции зависит от присутствия быстрых нейтронов (нужны нейтроны с энергией не менее 6 МэВ), ибо сечение первой реакции мало для тепловых скоростей. Энергиями более 6 МэВ обладает небольшое число нейтронов деления и если зона воспроизводства тория находится в такой части реактора, где она облучается умеренно быстрыми нейтронами (~ 500 кэВ) то эта реакция может быть практически исключена. Если в исходном веществе находится  $^{230}\text{Th}$ , то образование  $^{232}\text{U}$  дополняется реакцией:  $^{230}\text{Th} + n \rightarrow ^{231}\text{Th}$  и далее как указано выше. Эта реакция превосходно идет и с тепловыми нейтронами. Поэтому подавление образования  $^{232}\text{U}$  (а это нужно по указанным ниже причинам) требует загрузки тория с минимальной концентрацией  $^{230}\text{Th}$ .

Образующийся в энергетическом реакторе изотоп  $^{232}\text{U}$  представляет проблему для охраны труда, поскольку он распадается на  $^{212}\text{Bi}$  и  $^{208}\text{Tl}$ , которые излучают  $\gamma$ -кванты высоких энергий. Поэтому препараты, содержащие большое количество этого изотопа следует перерабатывать в горячей камере. Наличие  $^{232}\text{U}$  в облучённом уране опасно и с точки зрения обращения с атомным оружием. Вызвано это последовательностью распада:  $^{232}\text{U} \rightarrow (76 \text{ лет, } \alpha \text{-распад}) \rightarrow ^{238}\text{Th} \rightarrow (1.913 \text{ лет, } \alpha \text{-распад}) \rightarrow ^{224}\text{Ra} \rightarrow (3.64 \text{ дней, } \alpha \text{- и } \gamma \text{-распад}) \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow (55.6 \text{ с, } \alpha \text{-распад}) \rightarrow ^{216}\text{Po} \rightarrow (0.155 \text{ с, } \alpha \text{-распад}) \rightarrow ^{212}\text{Pb} \rightarrow (10.64 \text{ ч, } \beta \text{- и } \gamma \text{-распад}) \rightarrow ^{212}\text{Bi} \rightarrow (60.6 \text{ мин, } \beta \text{- и } \gamma \text{-распад}) \rightarrow ^{212}\text{Po} \alpha \text{- и } \gamma \text{-распад}) \rightarrow ^{208}\text{Tl}, ^{212}\text{Po} \rightarrow (3 \cdot 10^{-7} \text{ с, } \alpha \text{-распад}) \rightarrow ^{208}\text{Pb}$  (стабилен),  $^{208}\text{Tl} \rightarrow (3.06 \text{ мин, } \beta \text{- и } \gamma \text{-распад}) \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ . Большое количество энергичных  $\gamma$ -лучей выделяется из-за последовательности распада  $^{224}\text{Ra}$ . 85% общей энергии образуется при распаде последнего члена ряда - тантала-208 - энергия гамма-лучей 2.6 МэВ. Накопление  $^{232}\text{U}$  неизбежно при производстве  $^{233}\text{U}$  в ториевом энергетическом цикле, что сдерживает внедрение его в энергетику.

Необычным является то, что чётный изотоп  $^{232}\text{U}$  имеет высокое сечение деления под действием нейтронов (для тепловых нейтронов 75 барн, резонансный интеграл 380), а также высокое сечение захвата нейтронов – 73 барна (резонансный интеграл 280).

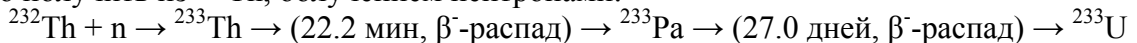
Есть и польза от  $^{232}\text{U}$ : он часто применяется в методе радиоактивных индикаторов в химических и физических исследованиях.

## U-233

$^{233}\text{U}$  открыт Сиборгом, Гофманом и Стоутоном. Уран-233 -  $\alpha$ -излучатель,  $T=1,585 \cdot 10^5$  лет, материнские нуклиды  $^{237}\text{Pu}(\alpha)$   $^{233}\text{Np}(\beta^+)$   $^{233}\text{Pa}(\beta^-)$ , дочерний нуклид  $^{229}\text{Th}$ .

Уран-233 получается в атомных реакторах из тория:  $^{232}\text{Th}$  захватывает нейтрон и превращается в  $^{233}\text{Th}$ , который распадается на  $^{233}\text{Pa}$ , а затем в  $^{233}\text{U}$ . Ядра  $^{233}\text{U}$  (нечётный изотоп) способны как к спонтанному делению, так и к делению под действием нейтронов любых энергий, что делает его пригодным к производству как атомного оружия, так и реакторного топлива (возможно расширенное воспроизводство ядерного горючего). Уран-233 также является наиболее перспективным топливом для газофазных ядерных ракетных двигателей. Эффективное сечение деления быстрыми нейтронами 533 барн, период полураспада 1585000 лет, в природе не встречается. Критическая масса  $^{233}\text{U}$  в три раза меньше критической массы  $^{235}\text{U}$  (около 16 кг).  $^{233}\text{U}$  имеет интенсивность спонтанного деления равную 720 делений/с·кг.

$^{235}\text{U}$  можно получить из  $^{232}\text{Th}$ , облучением нейтронами:



При поглощении нейтрона, ядро  $^{233}\text{U}$  обычно делится, но изредка захватывает нейтрон, переходя в  $^{234}\text{U}$ , хотя доля процессов неделения меньше, чем в других делящихся топливах ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) она остаётся малой при всех энергиях нейтронов. Отметим, что существует проект реактора на основе расплава солей, в котором протактиний физически изолируют, прежде чем он успеет поглотить нейтрон. Хотя  $^{233}\text{U}$ , поглотив нейтрон, обычно делится, всё же он иногда сохраняет нейтрон, переходя в  $^{234}\text{U}$  (этот процесс существенно менее вероятен, чем деление).

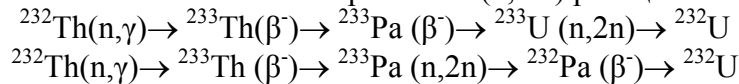
Наработка  $^{233}\text{U}$  из сырья для ториевой промышленности - долгосрочная стратегия развития ядерной индустрии Индии, имеющей существенные запасы тория. Бридинг можно осуществить или в быстрых или в тепловых реакторах. Вне Индии, интерес к топливному циклу на основе тория не слишком велик, хотя мировые запасы тория в три раза превосходят запасы урана.

Помимо топлива в атомных реакторах, можно использовать  $^{233}\text{U}$  в оружейном заряде. Хотя сейчас это делают редко. В 1955 США проверили оружейные качества  $^{233}\text{U}$ , взорвав бомбу на его основе в операции Teapot (заварной чайник). С оружейной точки зрения  $^{233}\text{U}$ , сравним с  $^{239}\text{Pu}$ : его радиоактивность – 1/7 ( $T=159200$  лет против 24100 лет у плутония), его критическая масса на 60% выше (16 кг против 10 кг), а скорость спонтанного деления выше в 20 раз ( $6 \cdot 10^{-9}$  против  $3 \cdot 10^{-10}$ ). Однако, но так как его удельная радиоактивность ниже, то нейтронная плотность  $^{233}\text{U}$  в три раза выше, чем у  $^{239}\text{Pu}$ . Создание ядерного заряда на основе  $^{233}\text{U}$  требует больших усилий, чем на плутонии, но технологические усилия примерно те же.



Основное различие – наличие в  $^{233}\text{U}$  примеси  $^{232}\text{U}$ , которая затрудняет работы с  $^{233}\text{U}$  и позволяет легко обнаружить готовое оружие.

Дело в том, что, как уже упоминалось, производство  $^{233}\text{U}$  путём облучения тория-233 нейтронами обязательно даёт небольшие количества  $^{232}\text{U}$  из-за паразитной (n, 2n) реакции на  $^{233}\text{U}$ , или на  $^{233}\text{Pa}$ :



Цепочка распадов  $^{232}\text{U}$  быстро приводит к возникновению сильных  $\gamma$ -излучателей:  $^{232}\text{U}$  ( $\alpha$ , 72 л),  $^{228}\text{Th}$  ( $\alpha$ , 1.9 л),  $^{224}\text{Ra}$  ( $\alpha$ , 3.6 дн, 0.24 МэВ),  $^{224}\text{Rn}$  ( $\alpha$ , 55 сек, 0.54 МэВ),  $^{216}\text{Po}$  ( $\alpha$ , 0.15 сек),  $^{212}\text{Pb}$  ( $\beta^-$ , 10.64 час),  $^{212}\text{Bi}$  ( $\alpha$ , 61 сек, 0.78 МэВ),  $^{208}\text{Tl}$  ( $\beta^-$ , 3 мин, 2.6 МэВ),  $^{208}\text{Pb}$ , что исключает использование при работе с  $^{233}\text{U}$  стандартных боксов, требуя применения эффективной защиты и использования манипуляторов.

Содержание  $^{232}\text{U}$  в оружейном  $^{233}\text{U}$  не должно превышать 5 частей на миллион (0.0005%). В коммерческом ядерном топливном цикле наличие  $^{232}\text{U}$  не представляет собой большого недостатка, даже желательна, поскольку это снижает возможность распространения урана для оружейных целей. Для экономии топлива, после его переработки и повторного использования уровень  $^{232}\text{U}$  достигает 0.1-0.2%. В специально спроектированных системах этот изотоп накапливается в концентрациях 0.5-1%.

В течение первых двух лет после производства  $^{233}\text{U}$ , содержащего  $^{232}\text{U}$ ,  $^{228}\text{Th}$  сохраняется на постоянном уровне, находясь в равновесии с собственным распадом. В этом периоде фоновое значение  $\gamma$ -излучения устанавливается и стабилизируется. Поэтому первые несколько лет произведенная масса  $^{233}\text{U}$  испускает значительное  $\gamma$ -излучение. Десятикилограммовая сфера  $^{233}\text{U}$  оружейной чистоты (5 миллионов долей  $^{232}\text{U}$ ) создает фон 11 миллибэр/час на расстоянии 1 м спустя 1 месяц после производства, 110 миллибэр/ч через год, 200 миллибэр/ч через 2 года. Ежегодная предельная доза в 5 бэр превышает уже через 25 часов работы с таким материалом. Даже свежий  $^{233}\text{U}$  (1 месяц со дня изготовления) ограничивает время сборки десятью часами в неделю. В полностью собранном оружии уровень радиации снижают поглощением корпусом заряда. В современных облегченных устройствах снижение не превышает 10 раз, создавая проблемы с безопасностью. В более тяжелых зарядах поглощение более сильное - в 100 - 1000 раз. Рефлектор из бериллия увеличивает уровень нейтронного фона:  $^9\text{Be} + \gamma\text{-квант} \rightarrow ^8\text{Be} + n$ .  $\gamma$ -лучи  $^{232}\text{U}$  образуют характерную сигнатуру, их можно обнаружить и отследить передвижения и наличие атомного заряда. Нарбатываемый по ториевому циклу специально денатурированный  $^{233}\text{U}$  (0.5 - 1.0%  $^{232}\text{U}$ ), создает ещё большую опасность. 10-килограммовая сфера, изготовленная из такого материала, на расстоянии 1 м через 1 месяц создает фон 11 бэр/час, 110 бэр/ч через год и 200 бэр/ч через 2 года. Контакт с такой атомной бомбой, даже при сокращении излучения в 1000 раз, ограничивается 25 часами в год. Наличие заметной доли  $^{232}\text{U}$  в делящемся веществе делает его крайне неудобным для военного применения.

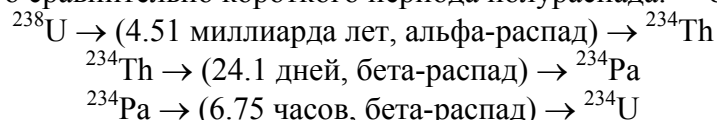
К тому же, короткий период полураспада у  $^{232}\text{U}$  делает его очень активным источником  $\alpha$ -частиц.  $^{233}\text{U}$  с 1%  $^{232}\text{U}$  имеет в три раза более сильную  $\alpha$ -активность, чем оружейный плутоний и, соответственно, большую радиотоксичность. Эта  $\alpha$ -активность вызывает рождение нейтронов в легких элементах заряда, представляя даже более серьезную проблему, чем реакция бериллия с  $\gamma$ -квантами. Для минимизации этой проблемы присутствие таких элементов как бериллий, бор, фтор, литий должно быть как можно меньшим. Наличие нейтронного фона совершенно не влияет на имплозионные системы. Для пушечных проектов требуемый уровень чистоты по легким материалам - одна часть к миллиону. Хотя такая очистка урана нетривиальная задача, она не выходит за рамки стандартных химических методов очистки.

Удельная радиоактивность  $^{233}\text{U}$  9.636 милликюри/г, давая  $\alpha$ -активность (и радиотоксичность) примерно 15% от плутония. Всего 1%  $^{232}\text{U}$  увеличивает радиоактивность до 212 милликюри/г.

Цепочка распада  $^{233}\text{U}$  относится к нептуниевому ряду. Один из продуктов распада  $^{233}\text{U}$  –  $^{213}\text{Bi}$ . Висмут 213 применяют в терапии некоторых типов рака, включая острую миелоидную лейкемию и раковые образования поджелудочной железы, почек и других органов.

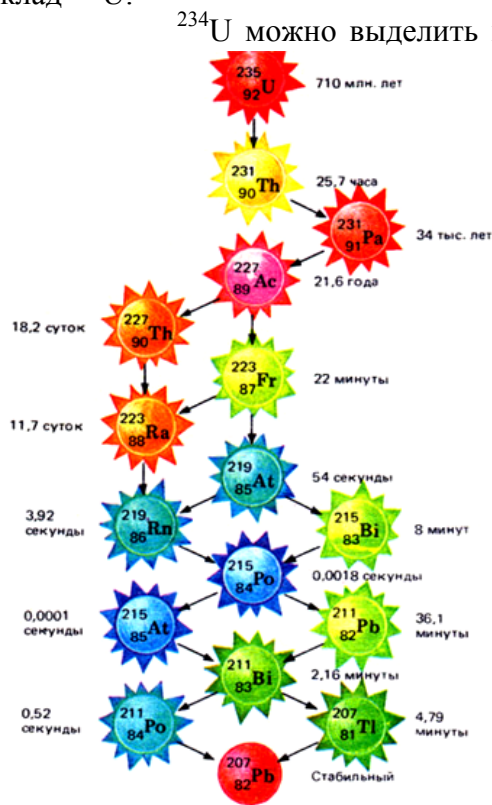
## U-234

Уран-234 (уран II) входит в состав природного урана (0,0055%),  $T=2,445 \cdot 10^5$  лет,  $\alpha$ -излучатель, материнские радионуклиды:  $^{238}\text{Pu}(\alpha)$ ,  $^{234}\text{Pa}(\beta^-)$ ,  $^{234}\text{Np}(\beta^+)$ , дочерний изотоп в  $^{230}\text{Th}$ . Содержание  $^{234}\text{U}$  в руде очень незначительно из-за его сравнительно короткого периода полураспада.  $^{234}\text{U}$  образуется по реакциям:



Обычно  $^{234}\text{U}$  находится в равновесии с  $^{238}\text{U}$ , распадаясь и образуясь с одинаковой скоростью. Однако распадающиеся атомы  $^{238}\text{U}$  существуют некоторое время в виде тория и протактиния, поэтому могут химически или физически отделиться от руды (выщелачиваться подземными водами). Поскольку  $^{234}\text{U}$  обладает относительно коротким временем полураспада, весь этот изотоп, находящийся в руде, образовался в

последние несколько миллионов лет. Примерно половину радиоактивности природного урана составляет вклад  $^{234}\text{U}$ .



## U-235

Уран-235 (актиноуран) – изотоп, способный давать быстроразвивающуюся цепную реакцию деления. Открыт Демпстером (Arthur Jeffrey Dempster) в 1935.

Это – первый изотоп, на котором была открыта реакция вынужденного деления ядер под действием нейтронов. Поглощая нейтрон,  $^{235}\text{U}$  переходит в  $^{236}\text{U}$ , который делится на две части, выделяя энергию и испуская несколько нейтронов. Делящийся нейтронами любых энергий, способный к самопроизвольному делению, изотоп  $^{235}\text{U}$  входит в состав природного урана (0,72%),  $\alpha$ -излучатель (энергия 4.679 МэВ),  $T=7,038 \cdot 10^8$  лет, материнские нуклиды  $^{235}\text{Pa}$ ,  $^{235}\text{Np}$  и  $^{239}\text{Pu}$ , дочерний -  $^{231}\text{Th}$ .

Интенсивность спонтанного деления  $^{235}\text{U}$  0.16 делений/с.кг. При делении одного ядра  $^{235}\text{U}$  выделяется 200 МэВ энергии =  $3,2 \cdot 10^{11}$  Дж, т.е. 18 ТДж/моль = 77 ТДж/кг. Однако 5% этой энергии уносится виртуально недектируемыми нейтронами. Ядерное сечение тепловыми нейтронами составляет примерно 1000 барн, а быстрыми нейтронами – около 1 барна.

Чистая 60-килограммовая масса  $^{235}\text{U}$  производит всего 9.6 делений/с, делая достаточно простой для изготовления атомной бомбы по пушечной схеме.  $^{238}\text{U}$  создает в 35 раз больше нейтронов на килограмм, так что даже маленький процент этого изотопа поднимает этот показатель в несколько раз.  $^{234}\text{U}$  создает в 22 раза больше нейтронов и имеет похожее с  $^{238}\text{U}$  нежелательное действие. Удельная активность  $^{235}\text{U}$  всего 2.1 микрокюри/г; загрязнение его 0.8%  $^{234}\text{U}$  поднимают ее до 51 микрокюри/г. Критическая масса оружейного урана. (93,5%  $^{235}\text{U}$ ) в водных растворах составляет менее 1 кг, для открытого шара – около 50 кг, для шара с отражателем – 15 – 23 кг.

В природном уране только один, относительно редкий, изотоп подходит для изготовления ядра атомной бомбы или поддержания реакции в энергетическом реакторе. Степень обогащения по  $^{235}\text{U}$  в ядерном топливе для АЭС колеблется в пределах 2-4.5%, для оружейного использования - минимум 80%, а более предпочтительно 90%. В США  $^{235}\text{U}$  оружейного качества обогащен до 93.5% (промышленность способна выдать 97.65%). Такой уран используется в реакторах для военно-морского флота.

**Замечание.** Уран с содержанием  $^{235}\text{U}$  более 85% называется оружейным ураном, с содержанием более 20% и менее 85% - ураном, годным к оружейному применению, поскольку из него можно приготовить «плохую» (неэффективную бомбу). Но из него можно изготовить и «хорошую» бомбу, если применить имплозию, нейтронные отражатели и некоторые дополненные ухищрения. К счастью, реализовать такие ухищрения на практике пока могут только 2-3 страны в мире. Сейчас, бомбы из урана, по-видимому, нигде не производятся (плутоний вытеснил уран из ядерного оружия), но перспективы урана-235 сохраняются благодаря простоте пушечной схемы урановой бомбы и возможности расширенного производства таких бомб при неожиданно возникшей необходимости.

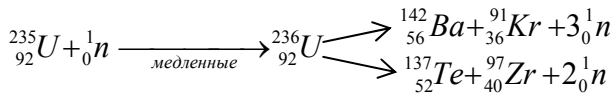
Будучи более легким,  $^{234}\text{U}$  пропорционально обогащается даже ещё в большей степени, чем  $^{235}\text{U}$  во всех процессах разделения природных изотопов урана, основанных на разнице в массах, что представляет

определённую проблему при производстве зарядов атомных бомб. Высокообогащенный  $^{235}\text{U}$  обычно содержит 1.5-2.0%  $^{234}\text{U}$ .

Деление  $^{235}\text{U}$  используется в атомном оружии, для производства энергии и для синтеза важных актинидов. Уран природного состава используется в ядерных реакторах для производства нейтронов. Цепная реакция поддерживается благодаря избытку нейтронов, образующихся при делении  $^{235}\text{U}$ , в то же время избыточные нейтроны, невостребованные цепной реакцией, захватываются другим природным изотопом,  $^{238}\text{U}$ , что приводит к получению плутония, также способного делиться под действием нейтронов.

### U-236

Встречается в природе в примесных количествах,  $\alpha$ -излучатель,  $T=2,3415 \cdot 10^7$  лет, распадается на  $^{232}\text{Th}$ . Образуется при бомбардировке нейтронами  $^{235}\text{U}$ , затем делится на изотоп бария и изотоп криптона с выделением двух нейтронов, гамма-лучей и высвобождением энергии:



В незначительных количествах входит в состав свежего топлива; накапливается при облучении урана нейтронами в реакторе, и потому используется как «сигнализатор» отработанного уранового ядерного топлива.  $^{236}\text{U}$  образуется как побочный продукт при сепарации изотопов методом газовой диффузии в случае регенерации использованного ядерного горючего. Этот изотоп имеет определённое значение как материал для мишени в ядерных реакторах. При использовании рециклированного (переработанного) урана в атомном реакторе возникает важное отличие по сравнению с использованием природного урана. Выделенный из ОЯТ уран содержит изотоп  $^{236}\text{U}$  (0,5%), который при его использовании в свежем топливе стимулирует наработку изотопа  $^{238}\text{Pu}$ . Это приводит к ухудшению качества энергетического плутония, но может быть положительным фактором в контексте проблемы ядерного нераспространения.

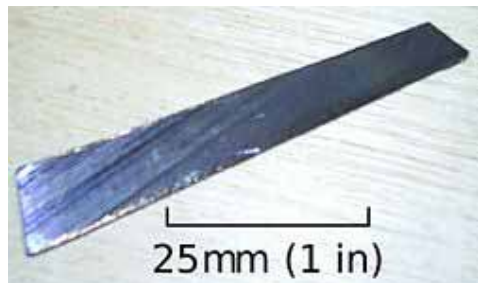
Образующийся в энергетическом реакторе  $^{236}\text{U}$  - нейтронный яд, его присутствие в ядерном топливе приходится компенсировать более высоким уровнем обогащения  $^{235}\text{U}$ .

### U-237

$^{237}\text{U}$ , бета-излучатель, часто применяется в методе радиоактивных индикаторов в химических и физических исследованиях.

### U-238

Уран-238 (уран I) - делящийся нейтронами высоких энергий (более 1 МэВ), способный к самопроизвольному делению, составляет основу природного урана (99,27%),  $\alpha$ -излучатель,  $T=4,468 \cdot 10^9$  лет, непосредственно распадается на  $^{234}\text{Th}$ , образует ряд генетически связанных радионуклидов, и через 18 продуктов превращается в  $^{206}\text{Pb}$ . Постоянная скорость распада ряда даёт возможность использования отношения концентраций материнского нуклида к дочернему в радиометрическом датировании. Период полураспада урана-238 по спонтанному делению точно не установлен, но он очень большой – порядка  $10^{16}$  лет, так что вероятность деления по отношению к основному процессу - испусканию альфа-частицы - составляет всего  $10^{-7}$ . Один килограмм урана даёт всего 10 спонтанных делений в секунду, а за это же время



$\alpha$ -частицы излучают 20 миллионов ядер. Материнские нуклиды:  $^{242}\text{Pu}(\alpha)$ ,  $^{238}\text{Pa}(\beta^-)$   $^{234}\text{Th}$ , дочерний -  $^{234}\text{Th}$ .

Рис. 6. Образец урана-238 весом 10 г.

Хотя уран-238 не может быть использован как первичный делящийся материал, из-за высокой энергии нейтронов, необходимых для его деления, он занимает важное место в ядерной отрасли. Имея высокую плотность и атомный вес,  $^{238}\text{U}$  пригоден для изготовления из него оболочек заряда/рефлектора в атомной и водородной бомбах. Тот факт, что он делится быстрыми нейтронами, увеличивает энерговыход заряда: косвенно, размножением отраженных нейтронов или непосредственно при делении ядер оболочки заряда быстрыми нейтронами (при синтезе). Примерно 40% нейтронов, образованных при делении и все нейтроны синтеза обладают достаточными для деления  $^{238}\text{U}$  энергиями.  $^{238}\text{U}$  имеет интенсивность спонтанного деления в 35 раз более высокую, чем  $^{235}\text{U}$ , 5.51 делений/с.кг. Это делает невозможным применение его в качестве оболочки заряда/рефлектора в бомбах пушечной схемы, ибо подходящая его масса (200-300 кг) создаст слишком высокий нейтронный фон. Чистый  $^{238}\text{U}$  имеет удельную радиоактивность 0.333 микрокюри/г. Важная область применения этого изотопа урана -

производство  $^{239}\text{Pu}$ . Плутоний образуется в ходе нескольких реакций, начинающихся после захвата атомом  $^{238}\text{U}$  нейтрона. Любое реакторное топливо, содержащее природный или частично обогащенный по 235-му изотопу уран, после окончания топливного цикла содержит в себе определенную долю плутония.

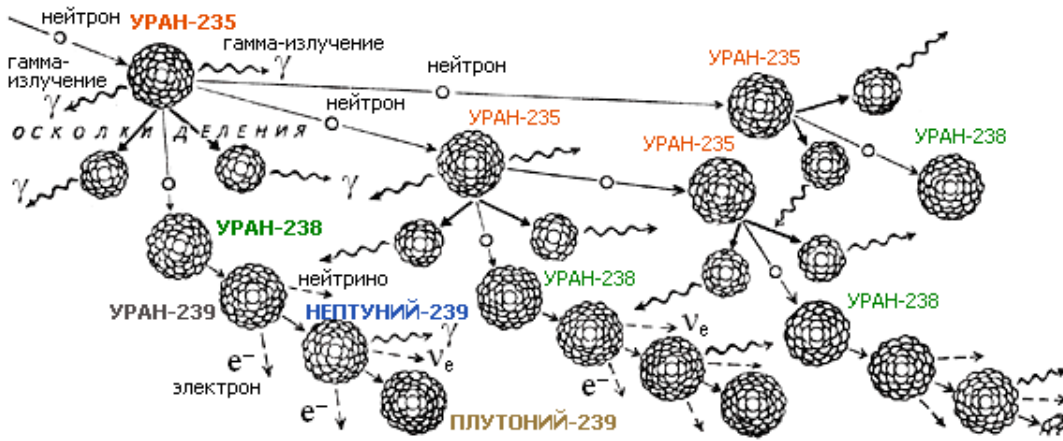


Рис. 7. Ядерные процессы при цепном делении урана.

Уран, получаемый из переработанного уранового топлива, помимо  $^{238}\text{U}$  содержит довольно большие количества  $^{236}\text{U}$  и все изотопы от  $^{232}\text{U}$  до  $^{238}\text{U}$  за исключением  $^{237}\text{U}$ .

Ядерные свойства некоторых изотопов урана допускают возможность снятия гамма-резонансных (мёссбауэровских) спектров. При этом изотопы  $^{234}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  используют в качестве поглотителей, а их материнские нуклиды  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{242}\text{Pu}$  - в качестве источников. Валентные переходы из состояния  $2^+$  в  $0^+$  подходят для проведения исследования по ядерному гамма-резонансу. Характеристики этих состояний приведены в Табл. .

Табл. 11. Ядерные свойства чистых изотопов урана и их материнских источников – изотопов плутония.

Изотоп урана	Энергия состояния, кэВ	Время жизни, нс	Суммарный коэффициент превращения	Материнский изотоп (источник)	Время жизни источника, лет	Удельная активность, мКи/мг
$^{234}\text{U}$	43,5	0,27	780	$^{238}\text{Pu}$	87,74	17,12
$^{236}\text{U}$	45,3	0,23	607	$^{240}\text{Pu}$	6,55.103	0,24
$^{238}\text{U}$	44,7	0,23	660	$^{242}\text{Pu}$	3,763.105	3,94.10-3

### Обедненный уран.

После извлечения  $^{235}\text{U}$  из природного урана, оставшийся материал носит название «обедненный уран», т.к. он обеднен изотопами  $^{235}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ . Уменьшенное содержание  $^{234}\text{U}$  (порядка 0,001%) снижает радиоактивность почти вдвое по сравнению с природным ураном, при этом уменьшение содержания  $^{235}\text{U}$  практически не сказывается на радиоактивности обеднённого урана.

В мире практически весь обеднённый уран хранится в виде гексафторида. США располагают 560000 тонн обедненного гексафторида урана ( $\text{UF}_6$ ) на трех газодиффузионных обогатительных производствах, в России – сотни тысяч тонн. Обедненный уран в два раза менее радиоактивен, чем природный уран, в основном за счет удаления из него  $^{234}\text{U}$ . Из-за того, что основное использование урана - производство энергии, на атомных реакторах тепловыми нейтронами, обедненный уран бесполезный продукт с низкой экономической ценностью.

С точки зрения безопасности, общепринято переводить газообразный гексафторид обеднённого урана в оксид урана, который является твердым веществом. Оксид урана либо подлежит захоронению, как вид радиоактивных отходов, либо может быть использован в реакторах на быстрых нейтронах для наработки плутония.

Решение о способе утилизации оксида урана зависит от того, как та или иная страна рассматривает обедненный уран: как радиоактивные отходы, подлежащие захоронению, или как материал, пригодный для дальнейшего использования. Например, в США обедненный уран до недавнего времени рассматривался как сырье для дальнейшего использования. Но с 2005 года такая точка зрения начала меняться и сейчас в США возможно захоронение обедненного оксида урана. Во Франции обедненный уран не рассматривается как

радиоактивные отходы, но предполагается к хранению в форме оксида урана. В России руководство Федерального агентства по атомной энергии считает отвалный гексафторид урана ценным материалом, не подлежащим захоронению. Начаты работы по созданию промышленной установки по переводу отвалного гексафторида урана в оксид урана. Получаемые оксиды урана предполагается хранить длительное время для дальнейшего их использования в реакторах на быстрых нейтронах или дообогащение его  $^{235}\text{U}$  с последующим сжиганием в тепловых реакторах.

Нахождение путей использования обедненного урана представляет собой большую проблему для обогатительных предприятий. В основном его использование связано с большой плотностью урана и относительно низкой его стоимостью. Две важнейшие сферы использования обедненного урана: в качестве радиационной защиты и как балластной массы в аэрокосмических применениях, таких как рулевые поверхности летательных аппаратов. В каждом самолете Боинг-747 содержится 1500 кг обедненного урана для этих целей. Обедненный уран в значительной степени применяется при бурении нефтяных скважин в виде ударных штанг (при канатном бурении), его вес погружает инструмент в скважины, наполненные буровым раствором. Этот материал применяется в высокоскоростных роторах гироскопов, больших маховиках, как балласт в космических спускаемых аппаратах и гоночных яхтах.

Но самое известное применение урана - в качестве сердечников для бронебойных снарядов. При определенном сплаве с другими металлами и термической обработке (сплавление с 2% Мо или 0.75% Ti, быстрая закалка разогретого до  $850^\circ$  металла в воде или масле, дальнейшее выдерживание при  $450^\circ$  5 часов) металлический уран становится тверже и прочнее стали (прочность на разрыв  $> 1600$  МПа). В сочетании с большой плотностью, это делает закаленный уран чрезвычайно эффективным для пробивания брони, аналогичным по эффективности существенно более дорогому монокристаллическому вольфраму. Процесс разрушения брони сопровождается измельчением в пыль основной части урана, проникновением пыли внутрь защищенного объекта и воспламенением его там. 300 тонн обедненного урана остались на поле боя во время Бури в Пустыне (по большей части это остатки снарядов 30-мм пушки GAU-8 штурмовых самолетов А-10, каждый снаряд содержит 272 г уранового сплава). Обедненный уран используется в танковой броне, например, танка М-1 "Абрамс" (США).