

## 2 ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА, АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДОВ

### Вводные пояснения

Практическое использование радионуклидов и метода меченых атомов делает необходимым использование такой характеристики, как активность радионуклида. *Активность* – это количественная мера радиоактивности вещества. Зависит от первоначального количества радиоактивного вещества, периода полураспада ( $T_{1/2}$ ), постоянной распада ( $\lambda$ ), то есть от процессов, происходящих в самом ядре. Поэтому *радиоактивность* определяется числом распадов радионуклидов в единицу времени (расп. /с; расп./ мин и т.д.).

В системе СИ за единицу радиоактивности принят беккерель (Бк): 1 Бк = 1 распад в секунду.

Внесистемной единицей является кюри (Ку):

$$1 \text{ Ku} = 3,7 \times 10^{10} \text{ расп./ с} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк.}$$

По закону радиоактивного распада радиоактивность источника ( $A$ ) прямо пропорциональна числу имеющихся в нем ядер, постоянной распада  $\lambda$ , но обратно пропорциональна периоду полураспада ( $T_{1/2}$ ) (формула 1).

$$A = \frac{N_0 \times 0,693}{T_{1/2}} \quad (1)$$

Постоянная распада связана с периодом полураспада изотопа следующим соотношением:  $\lambda = 0,693 : T_{1/2}$

Поэтому можно рассчитать количество распавшихся ядер по формуле 2.

$$Nt = No \times \lambda, \quad (2)$$

где  $Nt$  – количество распадающихся ядер в данный момент времени;  $No$  – первоначальное количество ядер;  $\lambda$  – постоянная распада для данного радионуклида.

Следовательно, активность можно определить по формуле 3.

$$A = No \times \lambda \quad (3)$$

*Период полураспада* ( $T_{1/2}$ ) – время, в течение которого происходит распад половины имеющихся в наличии радиоактивных атомов данного радионуклида.

*Постоянная распада* ( $\lambda$ ) – доля радиоактивных атомов, распадающихся за единицу времени.

В ряде случаев источники сравнивают между собой по их гамма-излучению. Если при одинаковых условиях измерения два радионуклида создают на стандартном расстоянии одну и ту же мощность экспозиционной дозы, то говорят, что они имеют одинаковый гамма-эквивалент. Единицей гамма-эквивалента является миллиграмм-эквивалент радия (мг-экв. Ra). 1 мг-экв. Ra – это гамма-эквивалент такого радиоактивного препарата, гамма-излучения которого при тождественных условиях измерения создает такую же мощность дозы, что и гамма-излучение 1 мг Ra при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм. Принято считать, что в таких условиях радий создает мощность дозы 8,4 Р/ч на расстоянии 1 см от источника. Гамма-эквивалент радионуклида М (мг-экв. Ra) связан с его активностью А (мКи) без фильтрации излучения следующим выражением (4):

$$M = A \times Kg/8,4 , \quad (4)$$

где  $Kg$  – полная гамма постоянная радионуклида – это мощность дозы (в Р/ч) от точечного источника активностью 1 мКи на расстоянии 1 см.

Гамма постоянные некоторых радионуклидов представлены в таблице 4.

Что же происходит с нуклидами в процессе радиоактивного распада? В качестве примера возьмем атом урана-238, в ядре которого протоны и нейтроны едвадерживаются вместе силами сцепления. Время от времени из него вырывается компактная группа из четырех частиц: двух протонов и двух нейтронов ( $\alpha$ -частица). Уран-238 превращается, таким образом, в торий-234, в ядре которого содержатся 90 протонов и 144 нейтрона. Но торий-234 также нестабилен. Его превращение происходит, однако, не так, как в предыдущем случае: один из его нейтронов превращается в протон, и торий-234 превращается в протактиний-234, в ядре которого содержатся 91 протон и 143 нейтрона.

*Таблица 4 – Значение гамма постоянных радионуклидов*

Радионуклид	Полная гамма-постоянная Kg, Р·см <sup>2</sup> /(ч·мКи)
-------------	---

Ir-192	4,65
Co-60	13,5
Cs-137	3,10
U-238	0,072
I-131	2,30
Na-24	19,06
K-40	0,81
Ba-140	2,52

Эта метаморфоза, произошедшая в ядре, сказывается и на движущихся по своим орбитам электронах: один из них становится не спаренным и вылетает из атома.

Протактиний очень нестабилен, и ему требуется совсем немного времени на превращение. Далее следуют иные превращения, сопровождаемые излучениями, и вся эта цепочка, в конце концов, оканчивается стабильным нуклидом свинца (рис. 3).

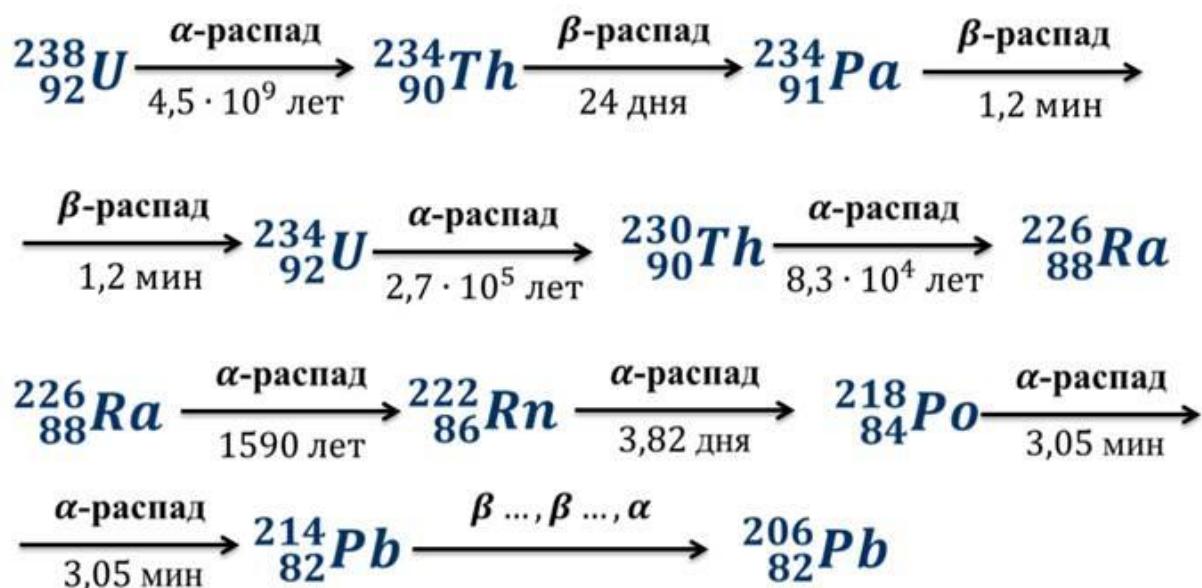
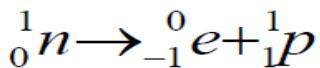


Рисунок 3 – Схема радиоактивного распада

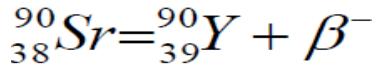
Бета-распад проявляется в двух видах:

- $\beta$ -электронный распад – распад с испусканием одного электрона ( $\beta$ -частицы) и антинейтрино;
- $\beta$ -позитронный распад – распад с испусканием одного позитрона ( $\beta^+$ – частицы ( $e^+$ ) – обладает массой электрона и зарядом, равным заряду электрона, но противоположным по знаку) и  $\beta$ -распаду предшествует процесс превращения в ядре нейтрона в протон:

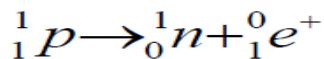


Поэтому при испускании электрона заряд ядра увеличивается на единицу, а массовое число не изменяется.

$\beta$ -электронный распад характерен для ядер с избыточным числом нейтронов. Примером электронного бета-распада может служить распад изотопа стронция-90:



*Позитронному распаду* предшествует ядерный процесс превращения протона в нейtron. Число протонов в ядре при позитронном распаде уменьшается на единицу, а массовое число не изменяется:



Известно, что в атомной массе ( $Am$ ) любого радионуклида содержится  $6,023 \cdot 10^{23}$  атомов (число Авогадро). Можно установить связь между активностью радионуклида  $A$  и его массой  $m$  (5):

$$A = m \times 6,023 \cdot 10^{23} \times 0,693/Am \times T_{1/2}, \text{ Бк}, \quad (5),$$

где  $T_{1/2}$  – период полураспада, с;  $6,023 \cdot 10^{23}$  – число Авогадро;  $m$  – масса радионуклида.

Из формулы (5) можно получить следующие соотношения (6):

$$\begin{aligned} A &= 1,13 \cdot 10^{13} / (AmT_{1/2}), \text{ где } (T_{1/2}, \text{ с}), \\ A &= 1,88 \cdot 10^{11} / (AmT_{1/2}), \text{ где } (T_{1/2}, \text{ мин}), \\ A &= 3,1 \cdot 10^9 / (AmT_{1/2}), \text{ где } (T_{1/2}, \text{ ч}), \\ A &= 1,3 \cdot 10^8 / (AmT_{1/2}), \text{ где } (T_{1/2}, \text{ сутки}), \\ A &= 3,57 \cdot 10^5 / (AmT_{1/2}), \text{ где } (T_{1/2}, \text{ годы}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $A$  – активность 1 г любого радионуклида, Кн.

*Удельная активность* – общая активность радионуклида, приходящаяся на единицу длины, площади, объема или массы в источнике. Указанные величины носят соответственно названия линейной, поверхностной, объемной и массовой удельной активности радионуклида.

### Порядок выполнения заданий

Рассмотрим примеры расчета активности радионуклидов и их превращений при радиоактивном распаде.

*Задача 1.* Активность  $A_0$  радиоактивного элемента  $P^{32}$  на

определенный день равна 5 мКи. Определить активность этого элемента через неделю? Период полураспада  $T_{1/2}$  элемента Р<sup>32</sup> составляет 14,3 дня.

*Решение.*

1. Активность любого радиоактивного препарата по истечении времени  $t$  определяют по формуле, соответствующей основному закону радиоактивного распада:

$$A_t = A_0 e^{-0,693 t / T}$$

Активность Р<sup>32</sup> через 7 суток:

$$A_7 = 5 \cdot 2,72^{-0,693 \times 7 / 14,3} = 5 \cdot 2,72^{-0,34} = 3,55 \text{ мКи.}$$

2. Для упрощения расчетов в 1954 году И.Н. Верховская предложила универсальный метод расчета поправок на радиоактивный распад. По этому методу время  $t$  выражается в долях периода полураспада, т.е. определяется соотношение этих параметров  $t : T_{1/2}$ , от которого зависит поправочный коэффициент  $K$ , рассчитанный И.Н. Верховской и представленный в таблице 5.

Используя этот метод для решения задачи, можно определить, что соотношение  $t : T_{1/2} = 7 : 14,3 = 0,49$ . По таблице 5 находим поправочный коэффициент  $K = 1,41$ . Это значит, что активность снизится в 1,41 раза и составит  $A_7 = 5 : 1,41 = 3,549 \text{ мКи}$ .

Очевидно, что полученные результаты примерно равны, но второй способ решения проще. Если таким способом нужно рассчитать исходную активность, то соответствующий коэффициент умножается на активность радионуклида, данную в условии задачи.

*Таблица 5 – Значение поправочного коэффициента на радиоактивный распад, выраженный в долях периода полураспада*

$t : T_{1/2}$	$K$	$t : T_{1/2}$	$K$
0	1,00	1,25	2,36
0,02	1,02	1,50	2,82
0,04	1,03	1,75	3,35
0,06	1,04	2,00	4,00
0,08	1,06	2,5	5,64
0,1	1,07	3,0	8,00
0,2	1,15	3,5	11,36

0,3	1,23	4,0	16,0
0,4	1,32	4,5	22,65
0,5	1,41	5,0	32,00
0,6	1,52	6	64,00
0,7	1,62	7	128,00
0,8	1,76	8	256,00
0,9	1,86	9	512,00
1,0	2,00	10	1024,00

*Задача 2.* Рассчитайте гамма-эквивалент иридия-192 активностью 2,2 ТБк.

*Решение.*

1. Определим активность источника в мКи:

$$2,2 \cdot 10^{12} \text{Бк} / 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк} = 59,46 \text{ Ки} = 5,946 \cdot 10^4 \text{ мКи}$$

2. Гамма-эквивалент составит:

$$M = 5,946 \cdot 10^4 \text{ мКи} \times 4,65 \text{ Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мКи}) / 8,4 = 32915 \text{ мг-экв.}$$

Ra = 32,915 г-экв. Ra.

*Задача 3.* Определить активность Co<sup>60</sup> на 1 сентября 2021 г., если на 1 января 2016 г. активность составляла 10 мг-экв. радия. Период полураспада T<sub>1/2</sub> Co<sup>60</sup> составляет 5,3 года.

*Решение.*

Для удобства расчетов переведем T<sub>1/2</sub> и t в месяцы. t=80 месяцев, T<sub>1/2</sub> = 64 месяца. Активность Co<sup>60</sup> на заданный момент времени A<sub>t</sub> = A<sub>0</sub> e<sup>-0,693t/T</sup>.

$$A_t = 10 \cdot 2,72^{-0,693 \cdot 80 : 64} = 10 \cdot 2,72^{-0,867} = 4,237 \text{ мг-экв. радия.}$$

Переведем активность, выраженную в мг-экв. радия, в мКи.

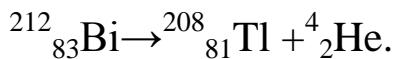
$$A = 8,4 M / Kg, \text{ где } Kg - \text{гамма постоянная } Co^{60} = 13,5 \text{ Р/ч}$$

$$A = 8,4 \cdot 4,237 : 13,5 = 2,64 \text{ мКи.}$$

*Задача 4. Определить, в какое ядро превратится ядро <sup>212</sup>Bi, испустив а-частицу?*

*Решение.*

Обозначим неизвестное ядро символом <sup>A</sup>Z<sub>X</sub>. Так как при а-распаде атомный номер изменяется на - 2, а массовое число на - 4, то Z = 83 - 2 = 81, A = 212 - 4 = 208. Элемент с порядковым номером 81 в периодической системе – таллий (Приложение 1). Следовательно, ядро <sup>212</sup>Bi превратится в ядро <sup>208</sup>Tl. Уравнение реакции имеет вид:



*Задача 5.* Определить массу радионуклида по его активности, если активность препарата  $^{32}\text{P}$  равна 2 мКи, период полураспада 14,5 суток?

*Решение.*

Учитывая формулы 1 – 3, активность препарата можно записать в виде выражения 7.

$$A = dN/dT = \lambda \times N = \frac{N \times 0,693}{T_{1/2}}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество ядер вещества,  $\lambda$  – постоянная распада;  $T_{1/2}$  – период полураспада.

Количество ядер в образце массой  $m$  определяется по формуле 8.

$$N = \frac{m \times N_A}{A}, \quad (8)$$

где  $N_A$  - число Авогадро,  $A$  - массовое число.

Используя эти формулы, можем вычислить массу:

$$m = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} \times 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп.в с} \times 14,5 \text{ суток} \times 8640 \text{ с в сутках} \times 32}{6,02 \cdot 10^{23} \times 0,693} = 7,1 \cdot 10^{-12} \text{ г.}$$

Тот же результат можно получить, используя соотношения 6. Так как период полураспада измеряется для данного нуклида в сутках, то можно вычислить активность 1 г этого вещества.

$A = 1,3 \cdot 10^8 / 32 \times 14,5 = 2,8 \cdot 10^5$  Ки. Составив пропорцию, можно узнать массу вещества, имеющего активность  $2 \cdot 10^{-6}$  Ки.

## Задания

1. Трава на участке выпаса, по данным радиохимического анализа, содержит йод-131 в концентрации 12 мКи/кг. Какова активность по йоду-131 будет через 24 дня, если период полураспада 8 суток? Какую дозу при выпасе на этом участке может получить корова в каждом случае, если рацион зеленой массы составит 15 кг?

2. Активность  $\text{Co}^{60}$  на 1 января 2019 года составляла 12 Ки. Определите активность этого препарата: а) на 1 мая 2019 г.; б) на 1 января 2021 г.? Период полураспада 5,3 года.

3. Конечная активность  $P^{32}$  составила 10 Ки. Определите исходную активность препарата, если период полураспада 14,5 суток?

4. Исходная активность стронция-90 ( $Sr^{90}$ ) составила 20 мКи. Определите его активность через: а) 7 суток; б) 30 суток; в) 2 года? Период полураспада 28 лет.

5. Определить начальную активность  $A_0$  радиоактивного магния  $^{27}Mg$  массой  $m = 0,2$  мкг, а также активность  $A$  по истечении времени  $t = 1$  ч. Предполагается, что все атомы изотопа радиоактивны, период полураспада 21,3 часа.

6. Определить активность 1 г радия-226 ( $^{226}_{88}Ra$ ), находящегося в равновесии с дочерними продуктами распада, если  $T_{1/2} = 1600$  мин.

7. Активность препарата  $^{32}P$  равна 50 Ки, период полураспада 14,5 суток. Сколько весит такой препарат?

8. Свежеприготовленный препарат содержит 1,4 мкг радиоактивного натрия ( $^{24}_{11}Na$ ). Какую активность он будет иметь через сутки?

9. Рассчитайте гамма-эквивалент цезия-137 активностью: а) 3200 Бк; б) 58 Ки?

10. Исходная активность радиоизотопа  $^{59}Fe$  равна 15 мКи, требуется рассчитать его активность через: а) 6 суток; б) 36 суток; в) 1 год. Период полураспада  $^{59}Fe = 45,1$  суток.

11. Элемент астат ( $At^{211}$ ) был получен облучением изотопа висмута-209 ( $^{209}_{83}Bi$ )  $\alpha$ -частицами ядер гелия. Напишите уравнения ядерной реакции. Сколько частиц гелия в ней приняло участие и какие частицы еще образовались в этой реакции? Ответ поясните.

12. Определите, какой элемент образуется при радиоактивном распаде радия  $Ra^{226}$ , если образуется одна  $\alpha$ -частица?

13. При бомбардировке ядер атомов бора  $B^{10}$  нейtronами был получен изотоп лития  $Li^7$ . Определите промежуточное ядро и выброшенную частицу. Напишите уравнение реакции.

14. В результате бомбардировки изотопа неона  $Ne^{21}$  некоторыми частицами образуется фтор и  $\alpha$ -частица. Определите бомбардирующую частицу.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон радиоактивного распада. Какие параметры радиоактивности с его помощью можно

прогнозировать?

2. Почему происходит радиоактивный распад? Чем отличаются  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады?

3. Что такое активность радиоизотопа и почему ее нужно учитывать?

4. Для чего рассчитывается гамма-эквивалент радионуклида?

5. Почему и как радиоактивность нуклида связана с его массой и временем распада?

6. Чем отличаются период полураспада от постоянной распада?

7. Как активность радионуклида влияет на дозу, получаемую животным или человеком?