

Решение задач по курсу радиационной физики

Пилипенко К.С.

15 сентября 2023 г.

Ионизирующее излучение. Основы дозиметрии

Граница спектра тормозного рентгеновского излучения

$$\lambda = \frac{1,23}{U},$$

где U — напряжение в рентгеновской трубке, кВ; λ_{min} , нм.

Поток рентгеновского излучения

$$\Phi = kIU^2Z,$$

где I и U — сила тока и напряжения в рентгеновской трубке, Z — порядковый номер элемента вещества анода, $k = 10^{-9} B^{-1}$.

Ослабление интенсивности излучения, проходящего через вещество (Закон Бугера)

$$I = I_0 e^{-\mu d},$$

где I_0 — интенсивность падающего на поверхность излучения, μ — линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения, который находится по формуле:

$$\mu = \mu_m \rho,$$

где ρ — плотность вещества.

Массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения

$$\mu_m = k\lambda^3 Z^3,$$

где k — коэффициент пропорциональности, λ — длина волны, Z — порядковый номер вещества-поглотителя.

7.1 Найдите границу тормозного рентгеновского излучения (частоту и длину волны) для напряжений $U_1 = 2kВ$ и $U_2 = 20kВ$. Во сколько раз энергия фотонов этих излучений больше энергии фотона, соответствующего $\lambda = 760$ нм (красный цвет)?

7.3 При прохождении потока рентгеновского излучения через костную ткань произошло ослабление в два раза. Учитывая, что толщина слоя костной ткани составляла 20 мм, найдите линейный коэффициент ослабления.

7.7 Сравните изменение массового коэффициента ослабления кости и мягких тканей при переходе от мягкого к жесткому рентгеновскому излучению. Принять энергию фотонов для мягкого излучения равной 30 кэВ, а для жесткого 120 кэВ.

7.17 Тело поглотило фотоны рентгеновского излучения с энергией 100 эВ, что значительно превышает энергию ионизации атомов данного вещества. Считая основным эффектом взаимодействие рентгеновского излуче-

ния с веществом когерентное рассеяние, найдите длину волны вторичного рентгеновского излучения, если вторичные электроны движутся со скоростью $3,7 \times 10^6$ м/с.

7.20 Считая, что поглощение рентгеновского излучения не зависит от того, в каком соединении атом представлен в веществе, определите, во сколько раз массовый коэффициент ослабления кости $Ca(PO_4)_2$ больше массового коэффициента ослабления воды?

7.21 Для рентгенодиагностики мягких тканей применяют контрастные вещества. Например, желудок и кишечник заполняют кашеобразной массой сульфата бария $BaSO_4$. Сравните массовые коэффициенты ослабления сульфата бария и мягких тканей (воды).

Ядро. Радиоактивность

Энергия связи ядра

$$\Delta E_{\text{св.}} = 931,5[Zm_H + (A - Z)m_n - m_a],$$

где m_H, m_n, m_a — массы соответственно изотопа водорода 1H , нейтрона и атома, а. е. м.; Z — число протонов в ядре (порядковый номер элемента), A — число нуклонов в ядре (массовое число); $\Delta E_{\text{св.}}$ выражается в мегаэлектрон-вольтах.

Основной закон радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где N_0 — начальное число радиоактивных ядер, N — их число к моменту времени t .

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

— постоянная распада, $T_{1/2}$ — период полураспада.

Изменение активности препарата со временем $[A] = 1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$
Бк (Беккерель)

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Используя уравнения **1** и **2** можно получить связь между активностью и числом частиц в момент времени t :

$$A = \lambda N$$

7.31 Выразите через постоянную λ распада или период полураспада $T_{1/2}$: а) вероятность того, что радиоактивное ядро распадется за время от 0 до t ; вероятность того, что радиоактивное ядро распадется за время от t до бесконечности; б) среднее время жизни радиоактивного ядра.

7.35 Возраст древних деревянных предметов можно приближенно опре-

делить по удельной массовой активности изотопа $^{14}_6\text{C}$ в них. Сколько лет тому назад было срублено дерево, которое пошло на изготовление предмета, если удельная массовая активность углерода в нем составляет $3/4$ от удельной массы активности растущего дерева? Период полураспада изотопа $^{14}_6\text{C}$ равен $T = 5570$ лет.

7.46 Препарат фосфора $^{32}_{15}\text{P}$ содержат нерадиоактивные примеси. Определите процентное соотношение радиоактивного и нерадиоактивного фосфора в 10 мг препарата, если его активность равна 25 мкКи.

7.48 В 1 мл морской воды содержится 10^{-15} г радона $^{222}_{88}\text{Rn}$ ($T_{1/2} = 3,825$ суток). Какое количество воды имеет активность, равную 10 мКи?

7.52 Для исследования щитовидной железы больному ввели 20 мл 10%-ного раствора глюкозы с радиоактивным йодом. Удельная активность йода в момент введения составляла 0,08 мкКи/мл. Найдите массу йода в растворе. Учтите, что каждая молекула глюкозы связывает один йод.

Основы дозиметрии

Удельная активность источника

$$A_m = \frac{A}{m},$$

где m — масса препарата.

Поглощённая доза

$$D = \frac{dE}{dm},$$

где dE — энергия излучения, поглощённая в данном объёме, m — масса вещества в этом объёме. В СИ: $[D] = \text{Дж/кг} = \text{Гр}(\text{Грей})$, внесистемные единицы: $[D] = 1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$.

Экспозиционная доза

$$X = \frac{dQ}{dm},$$

dQ — электрический заряд ионов одного знака, порождённый фотонами в элементарном объёме воздуха, m — масса воздуха в этом объёме. В СИ: $[X] = \text{Кл/кг}$, внесистемные единицы: $[X] = 1 \text{ Кл/кг} = 3880 \text{ Р}(\text{рентген})$.

Связь поглощённой и экспозиционной доз

$$D = fX,$$

где f — переходный коэффициент (для воды и мягких тканей человека $f = 1$), если D измеряется в радах, а X — в рентгенах.

Связь эквивалентной и поглощённой доз

$$H = kD,$$

где k — коэффициент качества, или относительная биологическая эффективность (ОБЭ). Коэффициент качества для рентгеновского и γ -излучения равен 1, для α -излучения он равен 20.

Предельно допустимая эквивалентная доза для населения составляет 0,05 бэр в год, а для профессионалов она равна 5 бэр в год.

Связь между активностью радиоактивного препарата (A) и мощностью экспозиционной дозы X/t

$$\frac{X}{t} = k_{\gamma} \frac{A}{r^2},$$

где k_{γ} — γ -постоянная, которая характерна для данного радионуклида; r — расстояние от источника ионизирующего излучения.

	Поглощённая доза D	Экспозиционная доза X	Эквивалентная доза H
СИ	1 Дж/кг = 1 Грей (Гр)	Кл/кг	Зиверт(Зв)
Внесистемные	рад 1 рад = 10^{-2} Гр	рентген (Р) 1 Кл/кг = 3880 Р	бэр (биологический эквивалент рада) 1 бэр = 10^{-2} Зв

7.59 В $m = 10$ г ткани поглощается 10^9 α -частиц с энергией около $E = 5$ МэВ. Найдите поглощенную и эквивалентную дозы. Коэффициент качества k для α -частиц равен 20.

7.60 Мощность экспозиционной дозы γ -излучения на расстоянии $r_1 = 1$ м от точечного источника составляет $P_1 = 2,15 \times 10^{-7}$ Кл/(кг·с). Определите минимальное расстояние от источника (r_{min}), на котором можно ежедневно работать по 6 ч без защиты. Предельно допустимой эквивалентной дозой при профессиональном облучении считать $H_{min} = 5 \times 10^{-2}$ Дж/кг в течение года. Поглощение γ -излучения воздухом не учитывать.

7.61 Средняя мощность экспозиционной дозы облучения в рентгеновском кабинете равна $6,45 \times 10^{-12}$ Кл/(кг·с). Врач находится в течение дня 5 ч в этом кабинете. Какова его доза облучения за шесть рабочих дней?

7.62 Смертельная доза для человека массой 70 кг при облучении всего тела рентгеновскими или γ -лучами равна 600 рад. На сколько градусов от нормальной поднимется температура тела человека при таком облучении, если считать его однородным фантомом с удельной теплоёмкостью 3,33 кДж/(кг·К)?

7.63 Радиационный фон в некотором городе составляет 30 мкР/ч. Определите поглощенную и экспозиционную дозы, полученные жителями этого города в течении года.

7.64 При исследовании радиочувствительности живых организмов крыс облучали рентгеновскими лучами в течение 4 ч. При этом полученная ими суммарная доза составила 300 бэр. Найдите мощность экспозиционной и поглощенной дозы в этом эксперименте (в системе СИ).

7.72 Интенсивность γ -излучения уменьшилось в шесть раз при прохождении через слой вещества толщиной 5 см. Найдите линейный коэффициент ослабления вещества.

7.73 На каком расстоянии от препарата с радиом активностью 100 мКи можно находиться, чтобы эквивалентная доза за шестичасовой рабочий день не превышала допустимую за сутки для профессионалов? Ионизационная постоянная радия $k_\gamma = 8,4 \text{ Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мКи})$

7.75 Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 10 см от источника составляет 85 мР/ч. На каком расстоянии от источника можно находиться без защиты, если допустимая мощность дозы равна 0,017 мР/ч?

Дополнительные задачи

7.11. Почему спектр тормозного рентгеновского излучения является сплошным?

7.14 Электроны в луче телевизионной трубки тормозятся веществом экрана. Напряжение, подаваемое на трубку, равно 20 кВ. Чем равна граничная длина волны λ_{min} спектра рентгеновского излучения, возникающего при торможении электронов?

Решение

7.43 При облучении нейтронами опухоли, избирательно накопившей радиоактивный бор $^{10}_5\text{B}$, образуется ^7_3Li и некоторое излучение, воздействующее на опухоль. Что это за излучение?

Решение

7.53 В источнике минеральной воды активность радона составляет 1000 Бк на 1 л. Какое количество атомов радона попадёт в организм пациента, выпившего стакан минеральной воды объёмом 0.2 л?

Решение