

ПРИКЛАДНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

§ 1. Дозиметрические единицы

1. Для количественной оценки воздействия ядерных излучений на вещество необходимо иметь какие-то единицы степени облучения вещества. Эти единицы называются *дозиметрическими*. Почти все практически используемые дозиметрические единицы — внесистемные. Рациональный выбор таких единиц осложнен тем, что механизм взаимодействия частиц с веществом сильно зависит от рода частиц и от их энергии.

На практике применяются дозиметрические единицы трех типов: а) единицы, описывающие интегральный по времени поток частиц, б) единицы, описывающие удельное поглощение энергии веществом, и в) единицы, описывающие интегральный по времени поток энергии, перенесенный частицами через вещество независимо от степени поглощения этого потока. Кроме того, специальные единицы приходится вводить для расчета биологического действия излучений.

2. Наиболее простой и точной дозой облучения является *интегральный поток* — число частиц, прошедших через единицу площади поперечного (по отношению к пучку частиц) сечения образца. Обычно применяется единица частица/см². В этих единицах необходимо указать сорт частиц и их энергию. Доза 10¹⁵ нейтрон/см² с энергией 1 МэВ произведет совершенно иное действие на вещество, чем доза 10¹⁵ фотон/см² с энергией 1 МэВ или доза 10¹⁵ нейтрон/см² с энергией 1 кэВ. Единицы интегрального потока неудобны тем, что с их помощью трудно сравнивать между собой результаты воздействия облучений, различающихся по сорту частиц и по их энергии.

3. Для наиболее интересной в прикладном отношении области энергий до 10 МэВ основные эффекты, вызываемые ядерными излучениями в веществе, пропорциональны энергии, поглощенной веществом, и часто в первом приближении не зависят от вида ядерного излучения и от энергии частиц. Из-за этой эмпирической закономерности оказалось удобным ввести понятие поглощенной дозы.

Поглощенной дозой называется энергия ионизирующего излучения, поглощенная единицей массы облучаемой среды. Единицей поглощенной дозы для излучений любых видов (α , β , γ и т. д.) является рад:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ эрг/г.}$$

Важно обратить внимание на прилагательное «ионизирующий» в определении поглощенной дозы. Оно означает, что при поглощении электронов в веществе надо учитывать только их ионизационные потери и ту часть радиационных потерь, которой соответствует тормозное излучение, поглощенное в самом веществе. При поглощении нейтронов надо учитывать, что ионизация создается не только ядрами отдачи, но и γ -излучением, возникающим в результате реакции (n, γ) радиационного захвата. Поэтому, в частности, поглощенная доза не будет малой при поглощении в веществе даже тепловых нейтронов, энергия которых ничтожна.

Понятие поглощенной дозы удобно для сравнения между собой действия облучений разных видов и энергий на разные материалы. Но и оно далеко не всегда удобно из-за того, что величина поглощенной дозы зависит как от свойств и геометрии источника излучения, так и от вида облучаемого материала. Образцы разных веществ, облученные в одном и том же пучке за одно и то же время, получают дозы в разное количество радов.

4. На практике чаще всего требуется такое понятие дозы, которое обладало бы хотя бы приближенной универсальностью в отношении энергии и сорта частиц и в то же время зависело бы только от свойств и геометрии источника излучения. Величиной такого рода является *доза облучения* (или, что то же самое, *экспозиционная доза*), выражающая количество излучения, прошедшего через вещество. Для рентгеновского и для γ -излучения единицей дозы облучения является рентген. 1 рентген (Р) соответствует дозе рентгеновского или γ -облучения, создающей в 0,001293 г воздуха (т. е. в 1 см³ сухого воздуха при 0°C и при давлении 760 мм рт. ст.) ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу электричества каждого знака.

В международной системе единиц СИ единицей дозы облучения является 1 кулон на кг (Кл/кг). Соотношение рентгена с международной единицей таково: $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$. Строго говоря, единицы рентген и Кл/кг применимы только к квантам с энергией не выше 3 МэВ. Фактически они используются и при более высоких энергиях.

Для измерения дозы облучения другими, отличными от γ -квантов частицами используется единица фэр (физический эквивалент рентгена). 1 фэр соответствует дозе облучения α -частицами, β -частицами или нейтронами, вызывающей такую же ионизацию, как и доза γ -излучения в 1 рентген. Доза в 1 фэр соответствует образованию $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см³ воздуха при нормальных условиях. Так как на образование одной пары ионов в воздухе в среднем тратится энергия 32,5 эВ (см. гл. VIII, § 6), то энергетически 1 фэр соответствует выделению в 1 см³ воздуха энергии $6,86 \cdot 10^{10} \text{ эВ} = 0,11 \text{ эрг}$. Отсюда следует, что в 1 г воздуха при дозе в 1 фэр выделяется энергия 83,8 эрг. Поглощение энергии в тканях человека

несколько выше и принимается равным 93 эрг/г. Это настолько близко к 100 эрг, что в практических дозиметрических расчетах величины 1 фэр и 1 рад обычно можно считать равными друг другу.

Более сложен вопрос о связи единиц поглощенной дозы и интегрального потока. Эта связь зависит как от вида излучения, так и от его энергии. Для рентгеновских и γ -лучей с энергиями от 70 кэВ до 2 МэВ с точностью до 15% выполняется простое соотношение:

$$1 \text{ P} = \frac{2 \cdot 10^9}{E \text{ МэВ}} \text{ фотон/см}^2.$$

5. Как мы увидим ниже в § 4, биологическое действие ядерных излучений зависит не только от дозы облучения, но и от их вида. Поэтому для дозы облучения живых организмов используется новая единица бэр (биологический эквивалент рентгена). Величина дозы D_6 в бэр связана с величиной той же дозы в фэр D_ϕ соотношением

$$D_6 = D_\phi \times \text{ОБЭ}, \quad (13.1)$$

где через ОБЭ обозначен эмпирический коэффициент, называемый *относительной биологической эффективностью*. Значения ОБЭ для разных видов излучений приведены в табл. 13.1. Следует подчеркнуть, что определение величины ОБЭ, а тем самым и единицы фэр не обладает принятой в физике точностью. Кроме того, даже в рамках принятой точности до одного знака значения ОБЭ для одного и того же вида излучения различны для разных биологических объектов.

Таблица 13.1. Коэффициенты ОБЭ для разных типов излучений

Тип излучения	ОБЭ
γ -излучение	1
β -частицы	1
Тепловые нейтроны	5
Быстрые нейтроны	10
Протоны	10
α -частицы	10

§ 2. Действие ядерных излучений на структуру вещества

1. Энергия попадающих в вещество заряженных частиц и γ -квантов в основном тратится на ионизацию и возбуждение атомов (см. гл. VIII). Ионизация в конечном итоге ведет к нагреванию вещества и обычно не вызывает в нем необратимых изменений. Однако некоторая, вполне заметная доля общей энергии потока заряженных частиц или γ -квантов, равно как и значительная доля энергии потока нейтронов, затрачивается на необратимое изменение структуры