

Лабораторная работа №11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИННОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Введение

Лучевая диагностика за последнее столетие претерпела бурное развитие, трансформацию методик и аппаратуры. Родоначальник лучевой терапии – рентгеновский метод – появился после открытия в 1895 году рентгеновского излучения. Гамма-терапия, кюри-терапия, совокупности методов лучевой терапии широко используются в основном для лечения больных со злокачественными опухолями.

Роль теоретических и экспериментальных исследований в онкорadiологии становится в последние годы все более ощутимой. Достижения в области ядерной физики и радиационной техники, успехи в области радиобиологии и онкологии, разработка высокоэффективных и радиационно безопасных технологий облучения, внедрение автоматизации в планирование программ облучения – все это превратило лучевую терапию в мощное средство лечения злокачественных новообразований.

Поглощенная доза ионизирующих излучений в воздухе достаточно просто устанавливается с помощью дозиметрических приборов, что нельзя сделать при определении доз, поглощенных в биологических тканях. Для определения дозы облучения в тканях человеческого организма пользуются измерениями дозы в различных тканеквивалентных веществах – фантомах, в которые помещается детектор дозиметрического прибора.

Методика определения глубинной дозы

В условиях биологического эксперимента и медицинской практики важно знать истинную величину поглощенной энергии излучения на поверхности или в глубине облучаемого объекта, которая собственно и определяет степень биологического поражения. Эти значения дозы не будут совпадать с экспериментальной дозой излучения, измеренной в воздухе. Такое неравенство в значении дозы обусловлено поглощением средой первичного потока излучения, а также рассеянным излучением, попадающим на облучаемый объем из соседних областей среды (рис. 30).

Доза излучения ($D_{\text{гл}}$), измеренная в некотором объеме в глубине облучаемой среды,

$$D_{\text{гл}} = D + D_{\text{расс}}, \quad (1)$$

где D – доза излучения, создаваемая в данном объеме узким пучком излучения, т. е. без учета рассеяния; $D_{\text{расс}}$ – доза, создаваемая рассеянным излучением, попавшим в этот объем от других частей объекта. Если облучаемый объем «А» находится на глубине d (см) от поверхности объекта (рис. 30), то

$$D = D'_0 e^{-\mu d}, \quad (2)$$

где D'_0 – доза излучения, измеренная в воздухе в точке А (рис.31) в отсутствие облучаемого объекта; μ – линейный коэффициент ослабления узкого пучка излучения в облучаемой среде. Соответственно глубинная доза

$$D_{\text{гл}} = D'_0 e^{-\mu d} + D_{\text{расс}}. \quad (3)$$

Доза, создаваемая рассеянным излучением $D_{\text{расс}}$, зависит от энергии падающего излучения, поля излучения, расстояния от источника и атомного номера облучаемой среды.

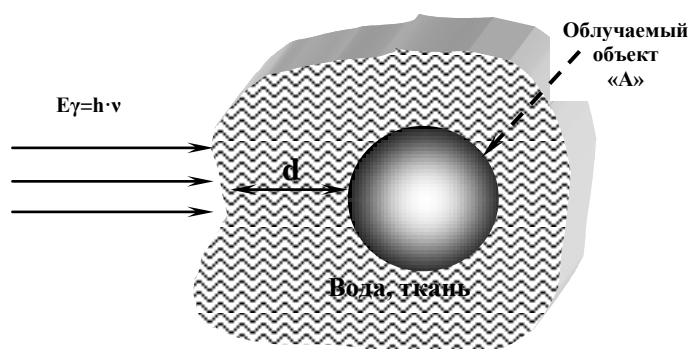


Рис.30. Облучение объема в глубине объекта.

Доза рассеянного излучения растет с увеличением поля облучения, так как увеличивается облучаемый объем, а следовательно, растет суммарное количество рассеянного излучения. Расчеты глубинной дозы сопряжены с большими математическими трудностями. Они выполнены частично для монохроматического излучения и лишь только вдоль оси пучка. Ввиду этого значения глубинных доз для излучений различного спектрального состава и различных полей облучения определяются экспериментально путем измерения дозы в модели (фантоме).

Фантом не является аналогом человеческого тела или какого-нибудь биологического объекта, однако с достаточной степенью точности можно считать, что доза, определенная в каком-либо месте фантома, будет соответствовать дозе излучения, создаваемой в подобном же месте облучаемого биологического объекта.

На основании фантомных измерений составляются таблицы глубинных доз для излучений различного спектрального состава при различных полях облучения и фокусного расстояния.

В таблицах обычно дается относительное значение глубинной дозы $D_{гд}/D_0$, где D_0 – доза излучения, создаваемая источником в воздухе в том же месте, где будет находиться поверхность облучаемого объекта; $D_{гд}$ – доза излучения на глубине d облучаемой среды (глубинная доза) (см. рис.19). Во многих случаях значение глубинных доз выражается в процентах. Экспериментальные данные о распределении ионизации в различных участках облучаемого объекта важны для расчетов экспозиций при гамма-терапии. Это дает возможность определить истинную дозу излучения внутри облучаемой среды, особенно при глубокофокусной гамма-терапии на глубине 8–10 см от поверхности тела человека. В качестве источника излучения обычно используется Co-60 (установка ГУТ-Co-400).

Экспериментальное определение глубинной дозы

Тканьэквивалентными называются вещества, поглощение излучений в которых такое же, как и в данной ткани (близкие порядковые номера, $Z_{тк} \sim Z_{вещ}$). В качестве фантома, заменяющего биологическую ткань, часто используется вода (в мягких тканях и клетках 90% воды).

На рис. 31 приведена схема размещения источника излучения А, экрана-диафрагмы Э для ограничения поля облучения фантома В (воды).

Обозначим дозу в точке S без фантома D. Очевидно, в присутствии фантома доза D_s в точке S будет большей, чем D вследствие наличия рассеянного излучения, приходящего в эту точку от различных точек фантома. Доза D_s зависит от энергии излучения, а также от площади облучения.

По величинам D и D_s определяются приведенные ниже параметры.

1. Коэффициент обратного рассеяния

$$K_{обр.р} = \frac{D_s}{D}, \quad (4)$$

или процент обратного рассеяния

$$K_{обр.р} = \frac{D_s - D}{D} \cdot 100\%. \quad (5)$$

2. Процентная глубинная доза D_z для рентгеновского излучения невысокой энергии до 1 МэВ (относительная доза)

$$D_z = \frac{D_d}{D_s}, \quad (6)$$

где D_d – доза излучения внутри фантома или объема на глубине d от поверхности M либо в процентах

поверхности M либо в

$$D_z = \frac{D_d}{D_s} \cdot 100\%. \quad (7)$$

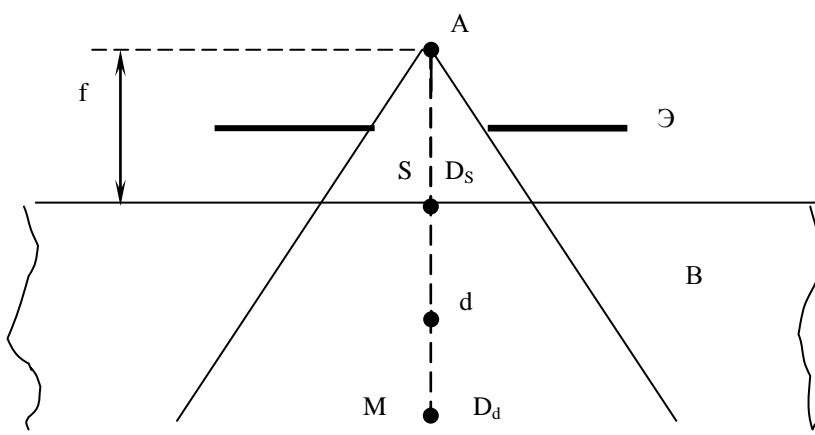


Рис.31. Схема опыта для определения поглощенной дозы в фантоме: f – расстояние от источника до поверхности фантома; точка S находится на поверхности фантома; точка M – в фантоме на глубине d .

В практических целях необходимо установить связь между мощностью дозы (дозой) и интенсивностью излучения. Пусть гамма-квант с начальной интенсивностью излучения L проходит через 1 см^3 воздуха. После прохождения гамма-квантами пути в 1 см интенсивность излучения $I = I_0 \cdot e^{-\mu}$, где μ – полный линейный коэффициент ослабления. Полный массовый коэффициент ослабления выражается через массовые коэффициенты поглощения за счет фотоэффекта τ_m , комптон-эффекта δ_m и образования пар $\lambda_m/\mu =$

$\tau_m + \delta_m + \lambda_m$.

Изменение интенсивности характеризует мощность дозы облучения:

$$\Delta I = P = \frac{D}{t} = (I_0 - I_0 e^{-\mu}) \cdot \frac{\gamma}{\mu}, \quad (8)$$

где γ – линейный коэффициент электронного преобразования. Так как линейный коэффициент ослабления для воздуха невелик, то $e^{-\mu}$ можно разложить в ряд и ограничиться двумя первыми членами: $e^{-\mu} = 1 - \mu$, тогда формула (8) примет следующий вид:

$$P = I_0 \gamma, \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}, \text{ или } D = I_0 \gamma \cdot t, \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}, \quad (9)$$

так как $1\text{p} = 0,114 \text{ эрг/см}^3$, то $P = I_0 \gamma \cdot \frac{I_0 \gamma}{0,114}$, P/c. (10)

Используя выражение (2), можно определить дозу в любой среде с порядковым номером Z, если известна доза в воздухе. Пусть для воздуха $D_B = I \cdot t \cdot \gamma_B$, а для другой среды Z, помещенной на таком же расстоянии от источника, $D_Z = I \cdot \gamma_Z \cdot t$. В обоих случаях интенсивность и время облучения одни и те же, тогда

$$D_Z = \frac{\gamma_Z}{\gamma_B} D_B. \quad (11)$$

Распределение дозы по глубине биоткани

Рассмотрим, как изменяется поглощенная доза по глубине биологической ткани при облучении ее плоским мононаправленным источником гамма-излучения, нормально падающим на плоскую границу полубесконечной сферы – биоткани (рис.32).

Если биологическая ткань окружена нерассеивающей и непоглощающей средой, то на ее поверхности ($d = 0$) поглощенная доза формируется только вторичными заряженными частицами, образовавшимися в биоткани при распространении косвенно ионизирующего излучения и приходящими в точку детектирования на поверхности среды из заднего пространства (точка А). С увеличением глубины d к ним добавляются частицы, приходящие из переднего слоя среды между ее границей и точкой детектирования. Это приводит к возрастанию поглощенной дозы.

Следовательно, формирование поглощенной дозы обусловлено двумя противоположными процессами: накоплением вторичного излучения и ослаблением первичного излучения.

Обычно до некоторой глубины d_0 преобладает первый процесс, после глубины d_0 – второй. На глубине d_0 поглощенная доза имеет максимальное значение (точка В).

Если в первичном излучении присутствуют также заряженные частицы, то поглощенная доза будет возрастать слабее (кривая ЕВС).

Для бета-излучения поглощенная доза с глубиной падает (кривая ЕВС). Степень воздействия излучения при облучении обычно принято характеризовать максимальным значением дозы облучения в теле человека.

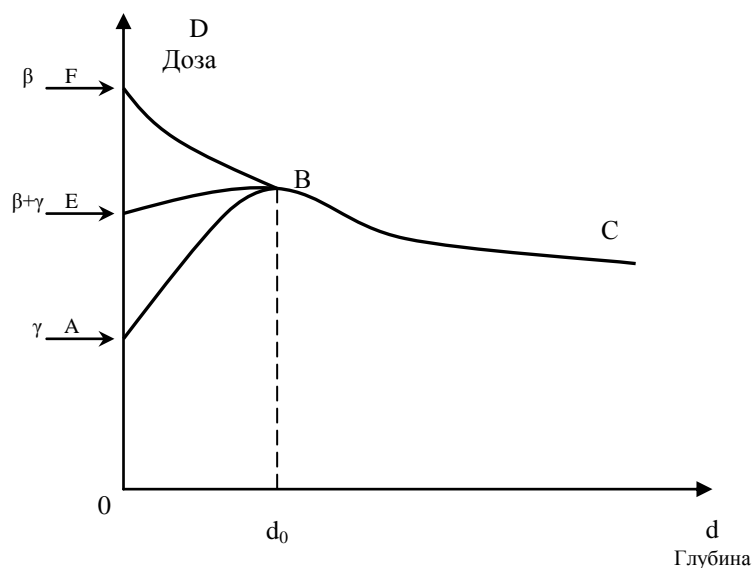


Рис.32. Распределение поглощенной дозы по глубине биоткани.

Использование этих значений доз исключает превышение допустимой дозы в любой точке тела человека.

Практическое использование глубинной дозы

Изодозные кривые в воде для гамма-лучей точечного источника Co-60 приведены в приложениях 5,6.

Приведенные кривые, характеризующие долю рассеянного излучения, позволяют определить истинную дозу излучения внутри облучаемой среды для различных фокусных расстояний без предварительных экспериментов. При глубокофокусной гамма-терапии очень важно создать как можно большую глубинную дозу на расстоянии 8–10 см от поверхности тела (облучение шейки матки, желудка и других внутренних органов). Естественно, что большая глубинная доза будет создаваться излучением больших энергий. Преимущество жесткого излучения состоит в том, что уменьшается переоблучение поверхностных тканей в силу того, что для излучения больших энергий доля обратного рассеяния меньше.

При облучении опухолей на глубине 8–10 см очаговая доза для Co-60 примерно на 23–25% больше, чем для рентгеновского излучения, а для Cs-137 и Ir-192 – соответственно на 13–15% и 7–8%.

Кроме того, обратное рассеяние для γ -лучей Co-60, Cs-137 и Ir-192 значительно меньше, чем для рентгеновского излучения, что приводит к меньшему переоблучению поверхностных тканей. Применение Co⁶⁰ для гамма-терапии дает лучший лечебный эффект, при этом менее ярко выражены лучевые осложнения, чем при рентгенотерапии.

Вследствие меньшей дозы рассеянного излучения у Co-60 и Cs-137 по сравнению с рентгеновским излучением (200 кэВ) наблюдается более резкое снижение интенсивности излучения на краях пучка, что также приводит к меньшему переоблучению здоровых тканей, окружающих опухоль.

В настоящее время Co-60 широко используется для гамма-терапии. В России в течение ряда лет эксплуатируется гамма-терапевтическая установка ГУТ-Co-400, заряженная Co-60 с гамма-эквивалентом 400 г·экв. радия. Мощность дозы, создаваемая таким препаратом, составляет 60 Р/мин для фокусного расстояния $F = 30$ см. В приложении 3 даются значения процентных глубинных доз для точечного источника Co-60 для фокусных расстояний 35 и 60 см, при которых проводят облучение на установке ГУТ-Co-400.

На основании фантомных измерений составляются таблицы глубинных доз для излучений различного спектрального состава при различных полях облучения и фокусных расстояниях.

На оси ординат отложено расстояние от поверхности фантома вдоль оси пучка, на оси абсцисс – расстояние m от оси пучка в перпендикулярном направлении. Указанная на кривых процентная глубинная доза отнесена к дозе, измеренной в воздухе в центре поля в месте расположения поверхности фантома.

В табл. 2 приведены значения процентных глубинных доз вдоль оси пучка для точечных источников Co-60 и Cs-137, измеренные при фокусных расстояниях 16,5 и 30 см. Пересчет на другие фокусы производится по формуле

$$P = P_d \frac{F_x^2 (F + d)^2}{F^2 (F_x + d)^2}, \quad (12)$$

где P – искомая процентная глубинная доза на глубине d для фокусного расстояния F_x ;

P_d – измеренная процентная глубинная доза для того же поля облучения на той же глубине d для фокусного расстояния F .

Таким образом можно определить истинную дозу излучения внутри облучаемой среды для различных фокусных расстояний без предварительных экспериментов.

Задача 1. Определение процентной глубинной дозы в воде.

Оборудование и приборы: 1) прибор СРП-68-01 или ионизационная камера; 2) штатив; 3) сосуд с водой; 4) источник ионизирующего излучения (коллиматор); 5) диафрагма (оргстекло, плексиглас).

На рис.33 приведена конструкция экспериментальной установки для определения глубинных доз в водяном фантоме.

Порядок выполнения задания. 1. Поместите источник излучения на расстоянии f от поверхности воды в сосуде.

2. Измерьте мощность дозы в точке S и рассчитайте дозу в точке D , за время t в присутствии фантома (воды).

3. Измерьте мощность дозы в точке S и рассчитайте дозу в этой точке за то же время без фантома.

4. Рассчитайте коэффициент обратного рассеяния и процент обратного рассеяния по формулам (1) и (2).

5. Измерьте мощность дозы в точке M фантома и глубже и рассчитайте процентную глубинную дозу в каждой точке по формулам (3) и (4).

6. Нанесите данные измерений на график, отложив по оси абсцисс глубины в сантиметрах, а по оси ординат – десятичный логарифм процентной глубинной дозы.

7. Рассчитайте поглощенную дозу в воздухе и воде (ткани) по полученным результатам измерений на различной глубине.

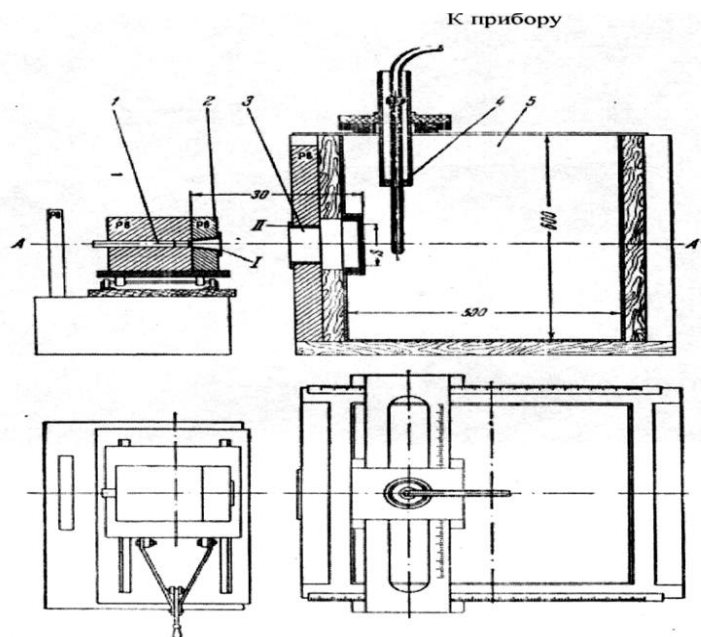


Рис. 33. Схема экспериментальной установки для измерения глубинных доз в водяном фантоме (размеры в мм): 1 – канал с источником излучения; 2 – свинцовая диафрагма; 3 – окошко для пуска пучка излучения в фантом, закрытое плексигласом; 4 – ионизационная камера; 5 – фантом, I и II – армировка из алюминия и меди.

За д а н и е 2. Определение глубинной дозы по таблицам и изодозным кривым.

Оборудование и приборы: 1) изодозные кривые (приложения 5,6);

2) таблицы глубинных доз гамма-излучения (приложения 7,8).

Порядок выполнения задания. 1. Рассчитайте процентную глубинную дозу на глубинах, предложенных преподавателем, по формуле (12).

2. Постройте изодозную кривую.

3. Определите тканевую дозу на рассчитанных глубинах в единицах их измерения, зная дозу на поверхности тела человека.

4. Постройте график относительного изменения глубинной дозы D/D_0 в воде вдоль центральной оси пучка гамма-лучей точечного источника, отложив по оси ординат D/D_0 , а по оси абсцисс – d в сантиметрах.

Контрольные вопросы

1. Что такое фантом?
2. Что такое эквивалентность?
3. Поясните на рисунке облучение объема в глубине объекта.
4. На основании чего составляются таблицы глубинных доз?
5. В каких областях радиобиологии используется глубинная доза?
6. Приведите схему лабораторной установки для измерения глубинной дозы.
7. Как рассчитать коэффициент обратного рассеяния?
8. По какой формуле определяется доза в любой среде, если известна доза в воздухе?