

## 6.5. Характеристики поля фотонного излучения в защитных средах

### 6.5.1. Факторы накопления

**Основные понятия и определения.** Ослабление гамма-излучения в средах может изучаться в условиях узкого и широкого пучка. Под этими терминами понимаются физические условия проведения измерений или расчетов. Узкий пучок, означает, что имеются такие условия, при которых детектор регистрирует лишь первичное нерассеянное излучение источника, т.е. лишь те кванты, которые прошли защитную среду между источником и детектором, не испытав актов взаимодействия с атомами или электронами среды. Широкий пучок связан с условиями, при которых детектор наряду с первичным нерассеянным излучением регистрирует многократно рассеянное в среде излучение.

Экспериментально геометрия узкого пучка может быть достигнута путем коллимирования пучка системами диафрагм (рис.62), использования тонких цилиндров, помещенных в нерассеивающую среду и измерением спектра нерассеянного в среде излучения спектротрическими методами (в последнем случае эксперимент обычно производится в геометрии широкого пучка).

При решении реальных задач защиты приходится иметь дело с широким пучком, в котором должны быть учтены как первичные, нерассеянные, так и многократно рассеянные гамма-кванты. На рисунке 63 представлены типичные для геометрии широкого пучка траектории гамма-квантов. В этой геометрии детектор будет регистрировать не только кванты, не взаимодействовавшие со средой (кванты 1), но и однократно (кванты 2) или многократно (кванты 3 или 4) рассеянные кванты. Некоторые кванты не достигают детектора из-за поглощения в веществе (кванты 5), из-за обратного рассеяния (кванты 6) или из-за иного направления за защитой (кванты 7 и 8).

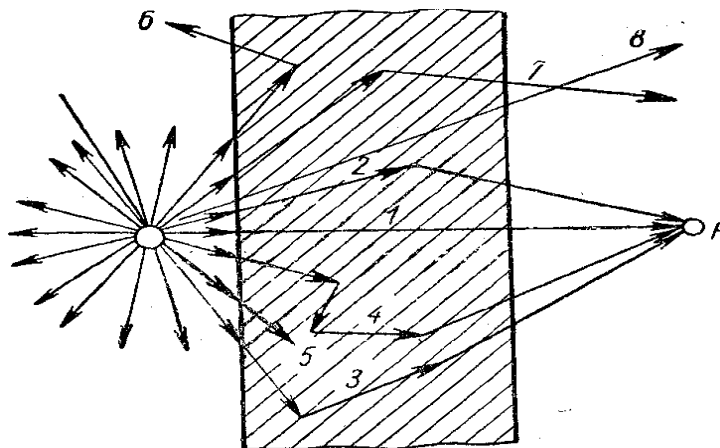


Рис. 62. Геометрия широкого пучка:  
S – источник; d – поглощающий экран; P – детектор.

Следовательно, детектор будет регистрировать большее количество гамма-квантов, чем в геометрии узкого пучка (где он регистрирует только гамма-кванты 1). При этом наряду с нерассеянными он будет регистрировать многократно рассеянные кванты меньших энергий. Вклад этих квантов в суммарную плотность потока частиц, интенсивность или мощность дозы может оказаться при определенных условиях во много раз большим, чем вклад первичного (нерассеянного) излучения.

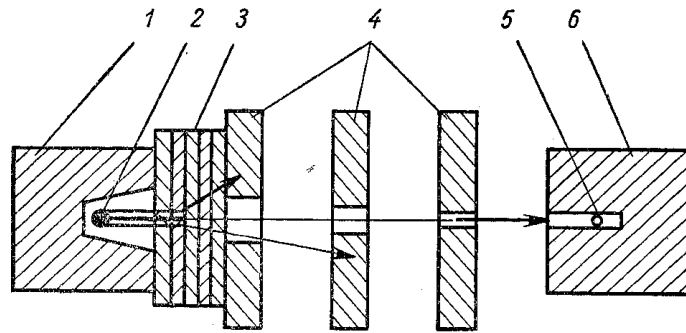


Рис.61. Экспериментальное воспроизведение геометрии узкого пучка:  
 1 – контейнер; 2 – источник; 3 – поглощающий экран; 4 – диафрагмы-коллиматоры;  
 5 – детектор; 6 – защита детектора.

По отношению к первичному этот вклад многократно рассеянного излучения может быть учтен специальным множителем «В», называемым фактором накопления (от английских слов **Build up factor**).

Пусть  $D_0$  и  $D_s$  – некоторые функции, описывающие поле излучения от нерассеянных и многократно рассеянных соответственно. Тогда фактор накопления В будет определяться соотношением:

$$B = \frac{D_0 + D_s}{D_0} = 1 + \frac{D_s}{D_0}.$$

Таким образом, фактор накопления характеризует кратность превышения характеристик поля нерассеянного плюс многократно рассеянного излучений над характеристиками поля нерассеянного излучения.

В простейшем случае (для точечного изотропного источника, помещенного в бесконечно протяженную однородную среду) фактор накопления зависит от энергии первичного излучения  $E$ , расстояния от источника до детектора  $r$  (или толщины защиты  $d$ ) и атомного номера среды  $Z$ . В более общем случае фактор накопления зависит от углового распределения гамма-излучения, геометрии источника и защиты, взаимного расположения источника, детектора и защиты. В зависимости от регистрируемого эффекта для определенного материала среды различают следующие виды факторов накопления:

- числовые (для плотности потока гамма-квантов);
- энергетические (для интенсивности гамма-квантов);
- дозовые (для экспозиционной дозы);
- поглощенной дозы (для поглощенной энергии).

**Факторы накопления для бесконечных гомогенных сред.** Числовые значения функций пространственно-энергетического распределения плотностей потоков  $\Phi(E, r)$  в бесконечной среде определяются из решения кинетического уравнения (уравнения переноса энергии) методом моментов. Рассмотрим влияние на факторы накопления основных параметров: энергии источника  $E$ , расстояния от источника до детектора  $r$  или толщины защиты  $\mu d$  и атомного номера среды  $Z$ .

Факторы накопления во всех случаях возрастают с увеличением  $\mu d$  и уменьшением  $Z$ . В средах с низким атомным номером фактор накопления монотонно уменьшается с увеличением энергии гамма-квантов. Это объясняется уменьшением сечения комптоновского рассеяния с увеличением энергии. Для тяжелых материалов зависимость факторов накопления от энергии более сложная. При низких энергиях, где основным процессом взаимодействия является фотоэлектрический эффект, фактор накопления вначале возрастает с ростом энергии, достигает максимума в области около **2 МэВ**, а затем уменьшается, что обусловлено возрастанием роли эффекта образования пар. По мере увеличения толщины защиты максимум сдвигается в сторону больших энергий, что

связано с увеличением числа фотонов, рассеянных до энергии  $E_{мин}$  (при которой коэффициент ослабления принимает наименьшее значение). Ошибка расчета факторов накопления для основной области спектра лежит в пределах 5–10%. При небольших энергиях в средах с низким атомным номером, а также на малых и очень больших толщинах ошибка наибольшая и превосходит  $\pm 20\%$ , а при экстраполяции на другие среды или геометрии источников ошибка может превосходить указанные величины.

Для многих задач, в частности при расчетах полей излучения за защитой от протяженных источников, а также при расчетах поля излучения внутри объемных источников, необходимо факторы накопления вводить в подынтегральное выражение, что существенно усложняет решение таких задач.

Факторы накопления для барьерной гомогенной защиты. Метод моментов, которым рассчитаны факторы накопления в бесконечной среде, для ограниченных сред неприменим. Наиболее эффективным методом расчета в данном случае является метод случайных испытаний, или метод Монте-Карло. Проведенные расчеты энергетических факторов накопления плоских мононаправленных источников позволяют вычислить отношение энергии рассеянного излучения в барьерной геометрии к подобной величине в бесконечной геометрии в виде коэффициентов.

Как правило, максимальное расхождение в факторах накопления наблюдается для низких энергий, низкоатомных сред и небольших толщин.

Факторы накопления для ограниченных гомогенных сред. При решении практических задач защиты нередко встречаются ограниченные (в том числе теневого) защиты. Для точечных источников гамма-излучения ограниченных сред в виде цилиндров с радиусом «г» и длиной «l» и легких рассеивателей (вода, алюминий) отношение интенсивности рассеянного излучения для ограниченной и барьерной сред (в виде пластины) на выходе из защиты в точке детектирования рассчитываются по формулам приведенным в справочной литературе.

**Факторы накопления для гетерогенных защит.** Для некоторых источников (и прежде всего для атомных реакторов) защиту осуществляют в виде слоев, различных как по толщине, так и по атомному номеру материала. Нахождение факторов накопления для таких гетерогенных сред является трудной задачей.

**Спектрально-угловое распределение гамма-излучения за защитой.** Для решения многих задач важно знать не только пространственную характеристику поля излучения за защитой (спектральное распределение, мощность экспозиционной дозы, интенсивность, плотность потока и т. д.), но и более детальные спектрально-угловые характеристики распределения излучения.

Знание углового распределения рассеянного излучения на границе среды необходимо, например, при расчете факторов накопления ограниченных источников или ограниченных защит для точек, удаленных от поверхности защиты. Вследствие различных законов ослабления рассеянного и нерассеянного излучения, выходящего из защиты, в указанных случаях фактор накопления при удалении от поверхности защиты уменьшается. Данные по угловому распределению излучений на поверхности защиты являются также исходными при решении многих задач прохождения излучений через неоднородности в защите и т. д.

Информация по спектрально-угловому распределению гамма-излучения на границе среды получена экспериментально и расчетами методом Монте-Карло для точечного изотропного, плоского мононаправленного и плоского изотропного источников. Последние два типа источников по угловым распределениям представляют два предельных распределения, между которыми практически заключены все другие виды угловых распределений излучений плоских источников.

**Точечный изотропный источник ( $\theta > 10^\circ$ ).** Спектрально-угловое распределение интенсивности излучения для точечных изотропных источников на границе среды и геометрия рассмотренной задачи показана на рис.64, а схема экспериментальной

установки – на рисунке 65.

Коллимированный детектор перемещался по окружности радиусом  $R$  с центром в точке  $O$ . Толщина среды  $d$  изменялась примерно от 1 до 5-10 длин свободного пробега; угол  $\theta$  обычно изменялся в экспериментах от 5-10 до 75°.

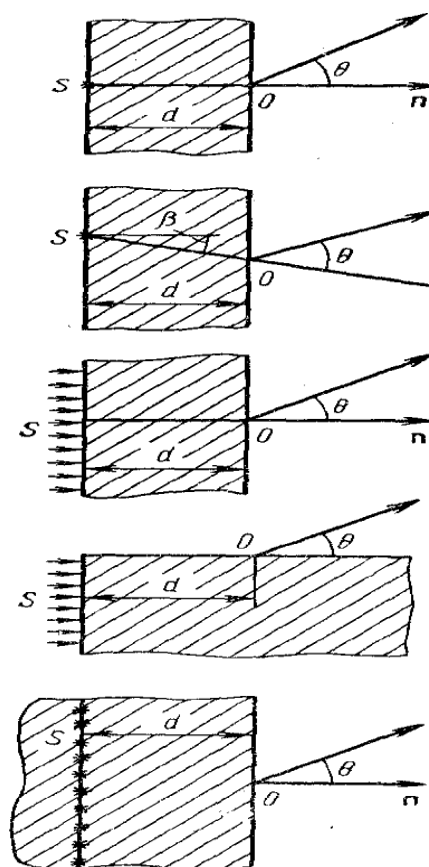


Рис. 64. Геометрия задач по изучению спектрально-углового распределения рассеянного гамма-излучения.

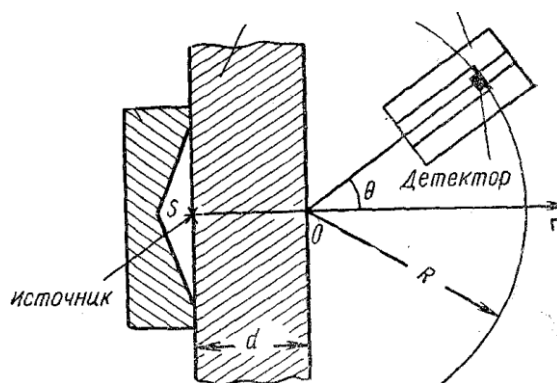


Рис. 65. Схема экспериментальной установки с точечным изотропным источником по изучению спектрально-углового распределения рассеянного гамма-излучения.

Общими для всех рассмотренных задач явились следующие закономерности формирования спектрального распределения интенсивности рассеянного излучения:

– энергетические распределения интенсивности рассеянного излучения во всех случаях имеют максимум, энергия которого расположена вблизи энергии гамма-квантов, однократно рассеянных на угол  $\theta$ . Максимум обусловлен однократно рассеянными на угол  $\theta$  и многократно рассеянными на малые углы гамма-квантами. Роль этого максимума

в спектральном распределении возрастает с увеличением  $Z$  и уменьшением угла  $\theta$ .

– для легких сред в области низких энергий имеется второй максимум, появление которого связано с малым фотоэлектрическим поглощением в легких средах. Положение этого максимума зависит от соотношения сечений фотоэлектрического поглощения  $\tau$  и комптоновского рассеяния;

– в спектральном распределении имеются гамма-кванты, энергия которых превышает энергию однократного рассеяния на угол  $\theta$ . Появление этих квантов обусловлено многократным рассеянием на тот же угол  $\theta$ ;

– форма угловых и энергетических распределений интенсивности рассеянного излучения слабо изменяется с изменением толщины среды.

Большой круг задач для своего решения требует знания углового распределения интенсивности излучения. Проведенные исследования показали, что угловое распределение интенсивности рассеянного гамма-излучения в единицу телесного угла в направлении  $\theta$ , отсчитываемом от нормали к поверхности.

Определяющую роль в формировании поля рассеянного гамма-излучения за защитой в точке «0» играют фотоэлектрическое поглощение и комптоновское рассеяние. В зависимости от энергии гамма-излучения источника изменяется вероятность этих процессов.