

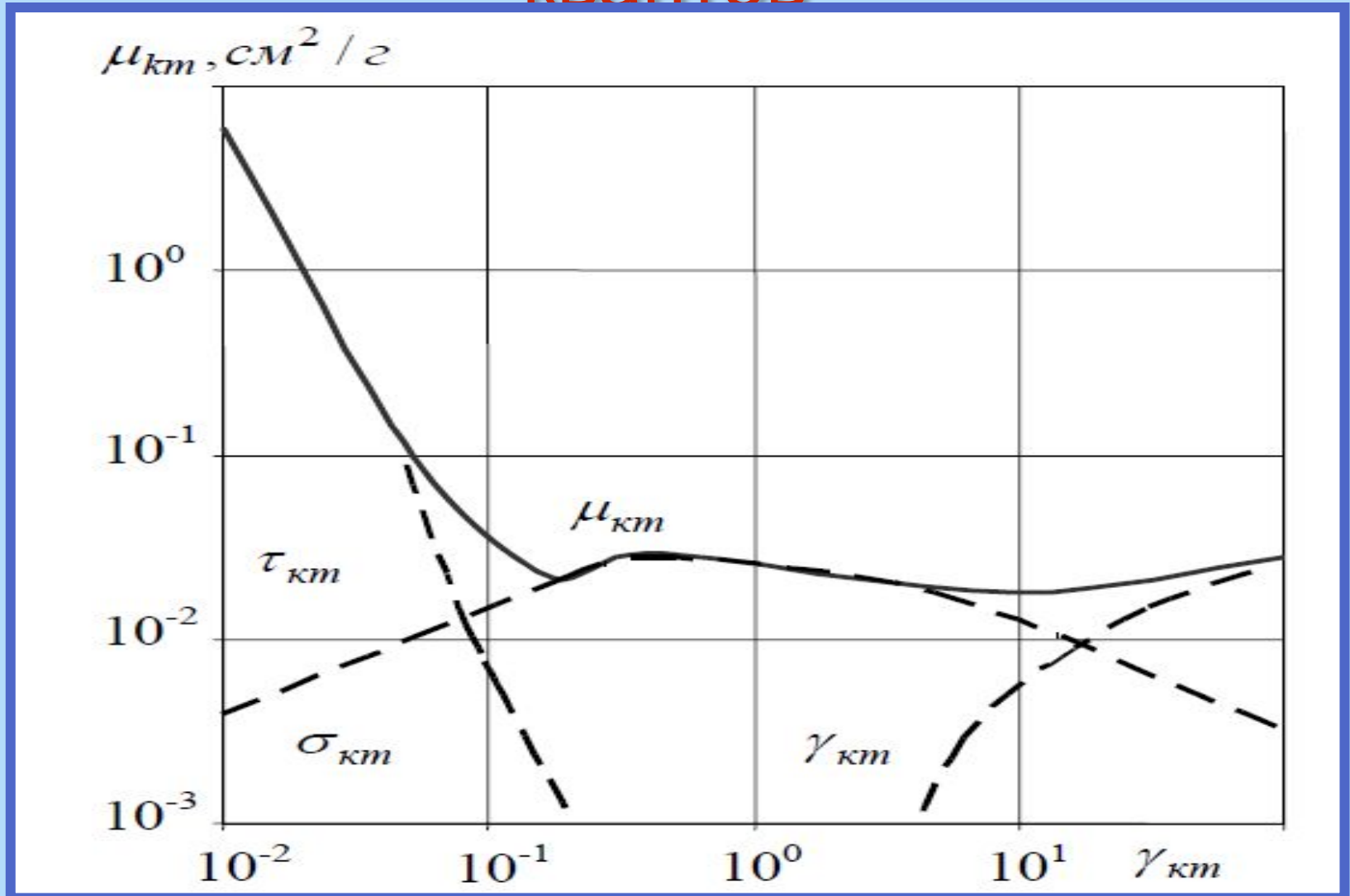
# ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАЩИТ

## Закон ослабления нерассеянного $\gamma$ -излучения

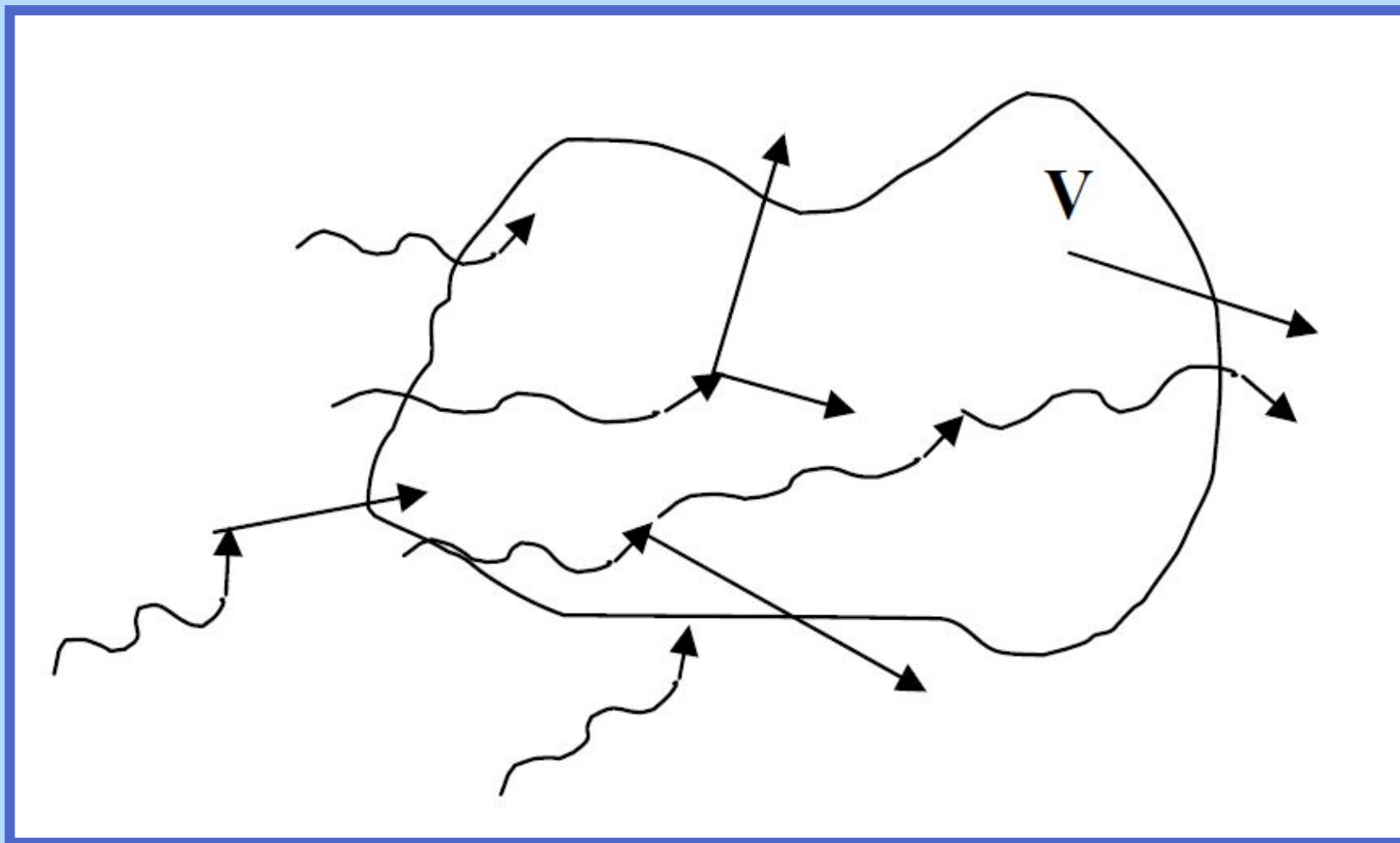
$$\Phi(x) = \Phi(0) \times \exp(-\mu x)$$

где  $\Phi(0)$  — плотность потока частиц, летящих перпендикулярно к поверхности плоского слоя вещества толщиной  $x$ ,  $\Phi(x)$  — плотность потока частиц не испытавших взаимодействия после прохождения слоя вещества толщиной  $x$

# Зависимость коэффициента передачи энергии в воздухе от энергии гамма-квантов



# Преобразование энергии гамма-квантов в энергию электронов



# Формулы при нахождении мощности кермы и поглощенной дозы

- $$K = \int_0^{E_{max}} I(E_\gamma) \mu_{km}(E_\gamma) dE_\gamma \quad (10)$$

$$P = \int_0^{E_m} I(E_\gamma) \mu_{em}(E_\gamma) dE_\gamma \quad (11)$$

где  $\mu_{km}(E_\gamma)$  и  $\mu_{em}(E_\gamma)$  — массовые коэффициенты передачи и поглощения, соответственно, для фотонов энергии  $E_\gamma$

**Объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать и.и., называется *источником ионизирующего излучения.***

Ядерно-технические установки обычно представляют собой сложные источники излучений. Например, у действующего реактора источником излучения является не только активная зона, но и система охлаждения, оборудование, конструкционные материалы и т. п.

Поле излучения реальных сложных источников представляют как суперпозицию полей излучения отдельных более простых источников.

### **ЛЮБОЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ:**

1. Видом излучения,
2. Геометрией источника (размером и формой),
3. Мощностью и ее распределением для протяженных источников,
4. Энергетическим спектром,
5. Угловым распределением излучения.

# Радионуклиды как гамма-излучатели

Интенсивность (плотность энергии) фотонов  $I$ ,  $\text{МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  в точке детектирования

$$I(r) = \frac{Q \cdot 10^{-4}}{4\pi r^2} \sum_{i=1}^N (E_{oi} \cdot n_{ji}) \quad (12)$$

Поглощенная доза с учетом (11)

$$P = \frac{Q \cdot \sum_{i=1}^N [E_{oi} \cdot n_{ji} \cdot \mu_{em}^i(E_{oi})] \cdot 1,602 \cdot 10^{-13}}{4\pi r^2 \cdot 10^4 \cdot W} \quad (13)$$

где  $Q$  — активность источника, Бк;  $\mu_{em}^i E$  — массовый коэффициент поглощения энергии фотонов в среде (например, в воздухе);  $W$  — энергетический эквивалент дозиметрической величины;  $1,602 \cdot 10^{-13}$  — коэффициент перевода 1 МэВ в джоули

# ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

## Классификация защит

ПО  
НАЗНАЧЕНИЮ:

**биологическ**

ая

**радиационн**

ая

**теплов**

ая

допустимый  
уровень  
облучения  
обслуживающего  
установку  
персонала

допустимый уровень  
радиационных  
повреждений  
конструкционных и  
защитных  
материалов

допустимый уровень  
радиационного  
энерговыведения и  
температурного  
распределения в  
конструкционных и  
защитных  
материалах

# ТИПЫ

## защит:

### Сплошная

защита

целиком окружает источник излучения, может ослаблять излучение одинаково во всех направлениях или быть ослабленной для областей, где допустимый уровень может быть увеличен, например, для областей ограниченного доступа персонала.

### Раздельная

защита

когда наиболее мощные источники и.и. окружает первичная защита, а между первичной и вторичной защитами имеются также источники излучения, например, система теплоносителя (контур многократной принудительной циркуляции (КМГЦ))

### Теневая

защита

устанавливается между источником излучения и защищаемой областью, размеры которой ограничиваются "тенью", "отбрасываемой" защитой. Особенно часто такая защита используется при ограничениях ее массы и габаритов.



**ПО**

**КОМПОНОВКЕ**

**гомогенная**  
(однородная)

**гетерогенная**  
(состоящая из слоев различных материалов)

**ПО ФОРМЕ**

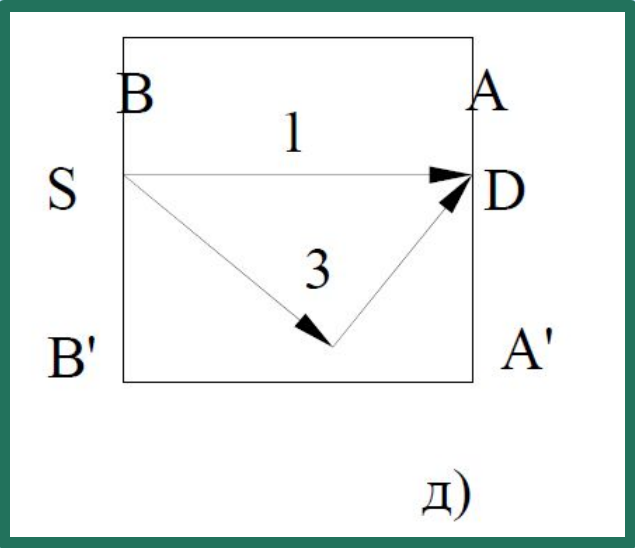
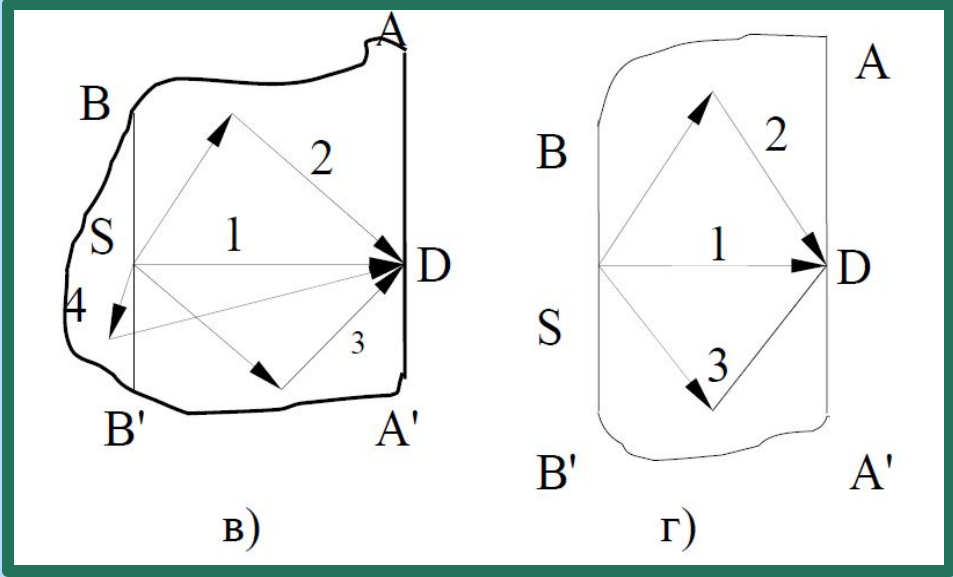
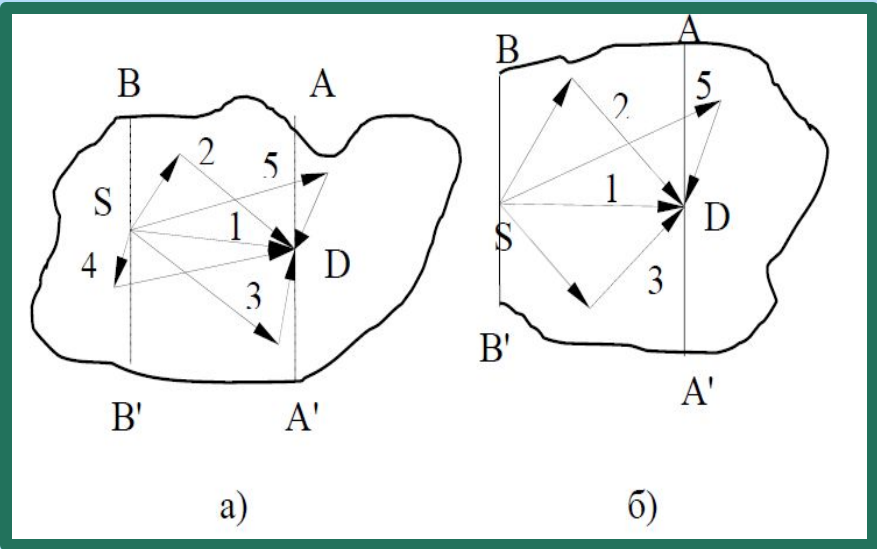
**ПОВЕРХНОСТИ**

**плоская**

**цилиндрическая**

**сферическая**

# ГЕОМЕТРИЯ ЗАЩИТ



1,2,3,4,5 – типичные траектории частиц в среде

# ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

## «ЗАЩИТА» БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКРАНОВ

Точечный изотропный источник фотонного излучения в непоглощающей среде:

$$\dot{H} = \frac{a \cdot Q \cdot \Gamma^*}{r^2}; H = \frac{a \cdot Q \cdot \Gamma^* \cdot t}{r^2}, \quad (14)$$

где  $Q$  — активность, Бк;  $r$  — расстояние, м;  $t$  — время работы в поле излучения источника, с;  $a = 1,09$  Зв/Гр — переходный коэффициент от мощности кермы в воздухе к мощности эквивалентной дозы;  $\Gamma^*$  — в Гр м<sup>2</sup>/с Бк

«защита временем – количеством – расстоянием»

# УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТАБЛИЦЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ

Для определения необходимой толщины защиты находят кратность ослабления  $K$  — отношение мощности дозы без защитного экрана к мощности дозы в том же месте с экраном

$$K = \frac{\dot{H}_0}{\dot{H}_d}$$

## Универсальные таблицы расчета защиты из свинца в зависимости от кратности ослабления К

К	d, см, при энергии фотонов, МэВ								
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,25	1,75	2,2
1,5	0,05	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	0,95	1,2	1,2
2	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,3	1,5	1,85	2,0
5	0,2	0,4	0,9	1,5	2,2	2,8	3,4	4,1	4,4
8	0,2	0,5	1,1	1,95	2,8	3,5	4,2	5,25	5,7
10	0,3	0,55	1,3	2,1	3,05	3,8	4,5	5,6	6,1
20	0,3	0,6	1,5	2,6	3,85	4,9	5,8	7,2	7,8
50	0,4	0,85	1,95	3,25	4,86	6,0	7,2	9,0	10,0
80	0,45	1,0	2,15	3,7	5,3	6,7	8,0	10,1	11,1
100	0,5	1,0	2,3	3,85	5,5	7,0	8,45	10,6	11,7
$2 \cdot 10^2$	0,6	1,25	2,9	4,4	6,3	8,0	9,65	12,2	13,4

## **Задачи, решаемые с помощью универсальных таблиц:**

- определение необходимой толщины защиты (или её избыток к уже существующей);
- кратность ослабления по заданной толщине защиты;
- Линейные или массовые эквиваленты отдельных защитных материалов;
- Слои половинного или десятикратного ослабления излучения.

**С хорошим приближением метод можно применять для оценки протяженных источников**

# РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЕВ ПОЛОВИННОГО ОСЛАБЛЕНИЯ

Толщину защитного экрана, снижающую уровни излучения в 2 раза, называют **слоем половинного ослабления**  $\Delta_{1/2}$

При расчете защиты для достижения кратности ослабления  $K$  в широком пучке (с учетом рассеянного излучения):

$$K=2^n$$

где  $n$  – требуемое число слоёв половинного ослабления.  
Тогда

$$d= n \cdot \Delta_{1/2}$$

если известна  $\Delta_{1/2}$  материала защиты для условий поставленной задачи

# МЕТОД КОНКУРИРУЮЩИХ ЛИНИЙ

Для немонорезонансного излучателя с дискретным набором из разных энергий  $E_1, E_2, \dots, E_m$ :

$$\text{если } (d_{\text{гл}} - d_{\text{к}}) = 0, \quad \text{то } d = d_{\text{гл}} +$$

$$\Delta_{1/2} \\ \text{если } 0 < (d_{\text{гл}} - d_{\text{к}}) < \Delta_{1/2}, \quad \text{то } d = d_{\text{гл}} + \Delta_{1/2}$$

$$\text{если } (d_{\text{гл}} - d_{\text{к}}) > \Delta_{1/2}, \quad \text{то } d = d_{\text{гл}}$$

Широко используется при проектировании защиты от гамма-излучения смеси продуктов деления



## Классификация нейтронов

Условное наименование	Энергетический диапазон нейтронов
<b>Медленные:</b>	$E_n < 1 \text{ кэВ}$
ультрахолодные	$E_n < 10^{-7} \text{ кэВ}$
холодные	$10^{-7} \text{ эВ} < E_n < 5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$
тепловые	$5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ} < E_n < 0,2 \text{ эВ}$
надтепловые	$0,2 \text{ эВ} < E_n < 1 \text{ кэВ}$
<b>Промежуточные</b>	$1 \text{ кэВ} < E_n < 0,2 \text{ МэВ}$
<b>Быстрые</b>	$0,2 \text{ МэВ} < E_n < 20 \text{ МэВ}$
<b>Сверхбыстрые</b>	$E_n > 20 \text{ МэВ}$

# Взаимодействие нейтронного излучения с веществом

Нейтроны не имеют электрического заряда и поэтому не взаимодействуют с электрическим полем атома. Нейтрон без затруднений достигает ядра атома и в зависимости от энергии может вступать в различные ядерные реакции.

## ТИПЫ ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НЕЙТРОНОВ

```
graph TD; A[ТИПЫ ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НЕЙТРОНОВ] --> B[Упругое рассеяние на ядрах]; A --> C[Неупругое рассеяние на ядрах]; A --> D[Поглощение (радиационный захват)];
```

Упругое рассеяние на ядрах

Неупругое рассеяние на ядрах

Поглощение (радиационный захват)

Вероятность того или иного процесса определяется энергией нейтронов, атомным весом элементов и сечениями взаимодействия: быстрые нейтроны в основном испытывают упругие и неупругие рассеяния, а тепловые и медленные нейтроны в основном захватываются ядрами атомов.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕЙТРОНОВ

При проектировании защиты от нейтронного излучения необходимо учитывать следующее:

- при упругом рассеянии средняя потеря энергии нейтронов максимальна на легких ядрах (например на водороде, углероде) и минимальна на тяжелых;
- при неупругом рассеянии вероятность потери энергии нейтроном возрастает с увеличением заряда ядра и энергии нейтрона;
- быстрые нейтроны должны быть предварительно замедлены, так как процесс поглощения эффективен только для тепловых, медленных и резонансных нейтронов;
- поглощение тепловых и медленных нейтронов обеспечивается подбором наиболее эффективных поглотителей (кадмий, бор);
- после захвата тепловых нейтронов почти всегда возникает вторичное гамма -излучение, которое необходимо ослабить.

# СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К НЕЙТРОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

По характеру распределения нейтронов в средах все материалы защиты делятся на:

1. **легкие водородсодержащие** (вода, полиэтилен);
2. **легкие, не содержащие водорода** (углерод, карбид бора), используются при технических или технологических ограничениях на введение в защиту водородсодержащих сред;
3. **материалы, состоящие из элементов со средним атомным номером** (бетон, минералы);
4. **тяжелые материалы** (железо, свинец, молибден, вольфрам, титан) для снижения потоков гамма-квантов и уменьшения числа быстрых нейтронов;
5. **металловодородсодержащие среды**

## МЕТОД ДЛИН РЕЛАКСАЦИИ

$$\varphi(x) = \varphi_0 \cdot \exp(-x/L), \quad (1)$$

где  $\varphi_0$  — характеристика поля (плотность потока или дозы) нейтронов в точке детектирования без защиты;  $L$  — длина релаксации нейтронов в

Используется для определения мощности дозы быстрых нейтронов за защитой и для пространственного распределения источников замедляющихся нейтронов в многогрупповых расчетах

$$\varphi(x) = \varphi_0 \cdot \exp\left(-\sum_{i=1}^m \frac{\Delta x_i}{L_i}\right), \quad (2)$$

$\Delta x_i$  — толщина  $i$ -того участка,  $L_i$  — его длина релаксации,  $m$  — число участков, на которые защита разбита по толщине

Для защит, представляющих смесь легких и тяжелых ядер :

$$\frac{1}{L} = \frac{C_L}{L_L} + \frac{C_T}{L_T},$$

где  $L_L$  и  $L_T$  - длины релаксации легкого и тяжелого компонентов соответственно;  $C_L$  и  $C_T$  - относительные объемные концентрации легкого и тяжелого компонентов соответственно ( $C_L + C_T = 1$ )

# СЕЧЕНИЯ ВЫВЕДЕНИЯ

## СЕЧЕНИЯ ВЫВЕДЕНИЯ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

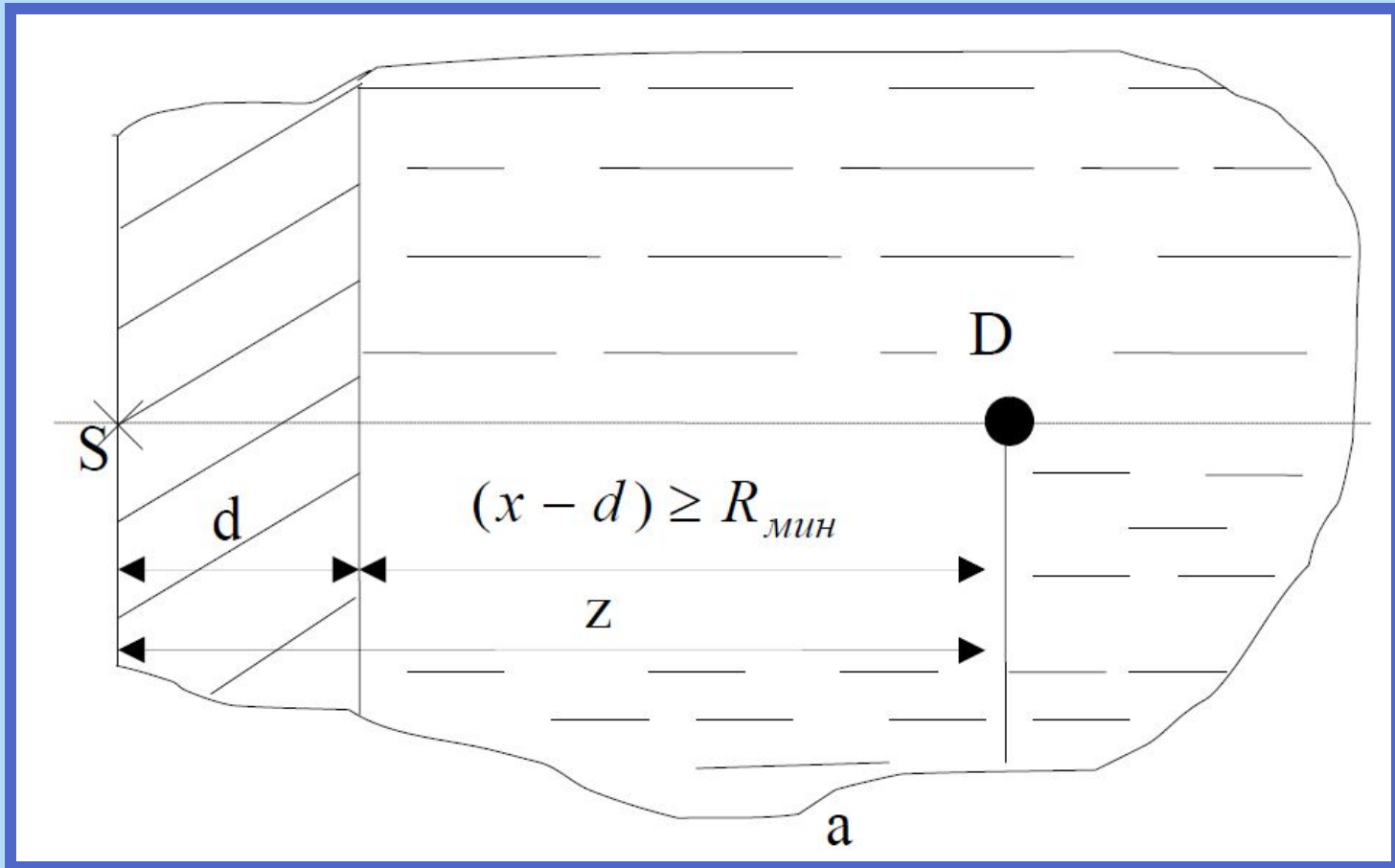


Рис. 1 Геометрия эксперимента по определению сечения выведения

## МОЩНОСТЬ ДОЗЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА РАССТОЯНИИ $x$ ОТ ИСТОЧНИКА

$$\dot{D}(x, d) = \dot{D}_H(x - d) \cdot \exp(-\Sigma_{gem} \cdot d),$$

$\dot{D}_H(x - d)$  - мощность дозы быстрых нейтронов в водородсодержащем материале толщиной  $x - d$ ;

$\Sigma_{gem}$  - сечение выведения,  $\text{см}^{-1}$ ;

$d$  - толщина защиты,  $\text{см}$



# СЕЧЕНИЯ ВЫВЕДЕНИЯ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ СПЕКТРА ДЕЛЕНИЯ,

$10^{-24} \text{ см}^2$

Элемент		Элемент	
Li	$1,01 \pm 0,05$	Fe	$1,98 \pm 0,08$
Be	$1,07 \pm 0,06$	Ni	$1,89 \pm 0,1$
B	$0,97 \pm 1,10$	Cu	$2,04 \pm 0,11$
C	$0,81 \pm 0,05$	Zr	$2,36 \pm 0,12$
O	$0,99 \pm 0,10$	Bi	$3,49 \pm 0,35$
F	$1,29 \pm 0,06$	Pb	$3,53 \pm 0,30$
Al	$1,31 \pm 0,05$	U	$3,16 \pm 0,40$
Cl	$1,2 \pm 0,80$	—	—