

Замедление нейтронов

*Изменение энергии нейтронов при рассеянии
Замедляющая способность вещества*

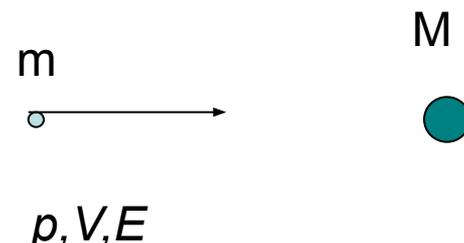
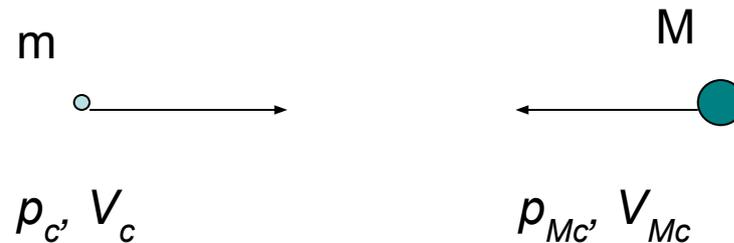
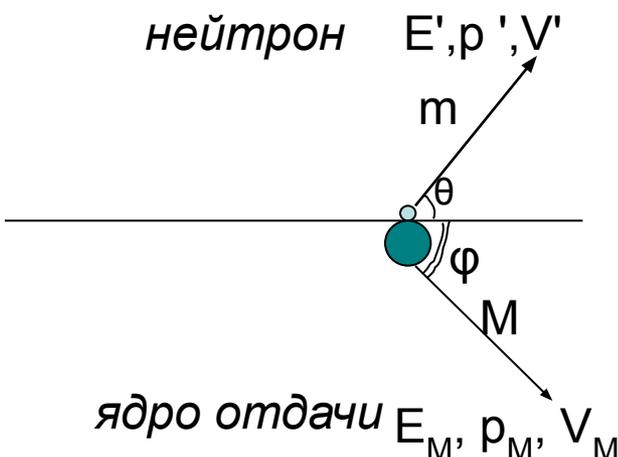
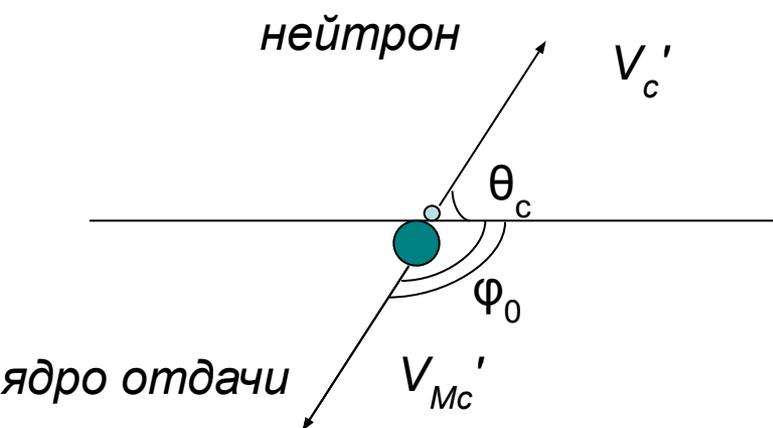
*Рябева Е.В.
2015*

Условия применимости теории замедления

В элементарной теории замедления используются следующие допущения.

- Учитывается только упругое столкновения .
- Ядро до столкновения покоится.
- При этом пренебрегаем неупругим столкновением быстрых нейтронов и химическими эффектами (*т.е. рассматриваются нейтроны с энергией $E > 1$ эВ*).
- Пренебрегаем утечкой из среды, т.е. считаем, что среда бесконечна.

Схемы упругого рассеяния в ЛСО и СЦИ

	Лабораторная Система Отсчета ЛСО	Система центра инерции СЦИ
До столкновения	 <p> m M p, V, E </p>	 <p> m M p_c, V_c p_{Mc}, V_{Mc} </p>
После столкновения	 <p> <i>нейтрон</i> E', p', V' m θ ϕ M <i>ядро отдачи</i> E_M, p_M, V_M </p>	 <p> <i>нейтрон</i> V'_c θ_c ϕ_0 <i>ядро отдачи</i> V'_{Mc} </p>

Изменение энергии при рассеянии

Из законов сохранения энергии и импульса

$$E_M = E \frac{4Mm}{(M+m)^2} \cos^2 \varphi = \alpha E \cos^2 \varphi,$$

$$\alpha = \frac{4Mm}{(M+m)^2}$$

Найдем какую наибольшую и
наименьшую энергию может
потерять нейтрон

$$\varphi = 90^\circ \rightarrow \cos^2 \varphi = 0; \text{ и } E_{M\min} = \alpha E \cos^2 \varphi = 0,$$

$$\varphi = 0^\circ \quad \cos^2 \varphi = 1 \text{ и } E_{M\max} = \alpha E.$$

Итак, нейтрон может потерять энергию в интервале от 0 до αE .

энергия нейтрона до
столкновения

минимально
возможное значение
энергии после
столкновения



Среднее значение потери энергии на одно столкновение (1)

Среднее значение можно найти обычным путем:

$$\bar{E}_M = \int_0^{\alpha E} E_M \omega(E_M) dE_M,$$

где $\omega(E_M)$ - вероятность данного значения E_M после одного столкновения.

Вероятность $\omega(E_M)$ должна быть пропорциональна дифференциальному сечению столкновения, приводящему к данному значению E_M .

Обычно известно $d\sigma(\theta)$ (θ - угол рассеяния нейтрона), надо перейти к $d\sigma(E_M)$.

Среднее значение потери энергии на одно столкновение (2)

Рассеяние считаем изотропным в координатной системе центра инерции. Вероятность вылета ядра отдачи под углом ϕ_0 (угол вылета ядра отдачи в системе центра инерции (СЦИ)) не зависит от угла ϕ_0)

Изотропия означает, что направление вектора скорости (или импульса) нейтрона после столкновения равновероятно по всем направлениям пространства. Если мы будем говорить о пространстве трехмерном, то нужно говорить о распределении элемент телесного угла или двух углов: азимутального угла ψ и орбитального угла – орбитального угла- обозначим его здесь- ϕ_0 .

Надо задаться вероятностью иметь значение угла ψ (с разбросом в пределах $d\psi$) и значение ϕ_0 (с разбросом $d\phi_0$) в элемент телесного угла, ограниченного $d\psi$ и $d\phi_0$, нормированного на 4π стерадиан. Такая вероятность для изотропного рассеяния равна

$$\omega(\psi, \phi_0) = \frac{1}{4\pi} \sin \phi_0 d\phi_0 d\psi$$

Проинтегрировав по всем возможным значениям азимутального угла ψ от 0 до 2π (предполагая изотропию рассеяния), получаем для зависимости от орбитального угла

$$\omega(\phi_0) d\phi_0 = \frac{1}{2} \sin \phi_0 d\phi_0.$$

Среднее значение потери энергии на одно столкновение (3)

Угол вылета ядра отдачи в СЦИ вдвое больше угла вылета в лабораторной системе отсчета (ЛСО), т.е. $\phi_0 = 2\phi$, то вероятность вылета ядра отдачи под углом ϕ равна

$$\omega(\phi)d\phi = \frac{1}{2} \sin \phi_0 d\phi_0 = 2 \sin \phi \cos \phi d\phi = d \cos^2 \phi$$

Поскольку $E_M = \alpha E \cos^2 \phi$, то вероятность данного значения E_M равна $\omega(\phi)d\phi = d(\cos^2 \phi) = d(E_M/\alpha E)$

$$\omega(E_M)E_M = \frac{E_M}{\alpha E}$$

$$\omega(E_M) = \frac{1}{\alpha E}$$

Т.е. при изотропном рассеянии вероятность любой энергии ядра отдачи от 0 до αE одинакова.

Следовательно, в результате одного упругого столкновения с ядром нейтрон может с одинаковой вероятностью иметь любое значение энергии в интервале от $(1-\alpha)E$ до E .

Средняя потеря энергии на водороде и тяжелых ядрах

Средняя потеря энергии на одно столкновение
:

$$\bar{E}_M = \int_0^{\alpha E} E_M \frac{dE_M}{\alpha E} = \frac{1}{2} \alpha E.$$

Среднее значение энергии, оставшейся у
нейтрона после одного столкновения,

$$\bar{E}_1 = \left(1 - \frac{1}{2} \alpha\right) E = \frac{A^2 + 1}{(1 + A)^2} E = \frac{M^2 + m^2}{(m + M)^2} E.$$

Отношение среднего значения , теряемой при
одном столкновении, к начальной энергии E
равно

$$\frac{\bar{E}_M}{E} = \frac{1}{2} \alpha = \frac{2Mm}{(M + m)^2}$$

Эта величина тем больше, чем ближе масса
ядра замедляющего вещества M к массе
нейтрона m .

Наибольшее значение средней относительной
потери энергии

$$\frac{\bar{E}_M}{E} = \frac{1}{2} \alpha = \frac{1}{2}$$

наблюдается при замедлении на водороде, так
как масса протона практически равна массе
нейтрона и
 $\alpha = 4Mm/(M+m)^2 = 1$.

Средняя потеря энергии на водороде и тяжелых ядрах

$$\frac{\bar{E}_M}{E} = \frac{1}{2} \alpha = \frac{1}{2}$$

Следовательно, при столкновении с протоном (покоящимся) нейтрон теряет в среднем половину своей энергии.

Для других ядер $\alpha < 1$ и средняя относительная потеря энергии
Для ядер с массой $M \gg t$ величина

$$\frac{1}{2} \alpha = \left(\frac{1}{2} \right) \frac{4Mm}{M^2 + 2Mm + m^2} \approx \left(\frac{1}{2} \right) \frac{4Mm}{M(M+2)} = \frac{2m}{M} = \frac{2}{A}$$

где A – массовое число, атомный вес.

Среднее логарифмическое изменение энергии

Так как средняя относительная потеря энергии нейтрона сохраняется постоянной при изменении абсолютного значения энергии в процессе замедления, то удобно характеризовать ее **средним изменением логарифма энергии при одном столкновении**

$$\xi = \overline{\ln \frac{E_0}{E_1}} = \overline{\ln \frac{E_n}{E_{n+1}}}.$$

Здесь n - порядковый номер столкновения, испытанного нейтроном. Из определения ξ ясно, что энергия E_n после n -го столкновения определяется соотношением

$$E_n = E_0 e^{-n\xi}$$

где E_0 – начальная энергия нейтрона.

Средняя потеря энергии на водороде и тяжелых ядрах

Величину ξ можно найти, усредняя $\ln(E_0/E_1)$ по распределению $\omega(E_1)$ – вероятности энергии E_1 после столкновения:

$$\xi = \int_{E_0(1-\alpha)}^{E_0} \ln \frac{E_0}{E_1} \omega(E_1) dE_1.$$

Возможные значения энергии нейтрона после столкновения: E_0 – нейтрон не потерял энергии; $E_0(1-\alpha)$ – потерял максимум энергии αE_0 .

$$\omega(E_1) dE_1 = \frac{dE_1}{\alpha E_0}.$$

$$\xi = \int_{(1-\alpha)E_0}^{E_0} \ln\left(\frac{E_0}{E_1}\right) \frac{dE_1}{\alpha E_0} = 1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \ln(1-\alpha),$$

$$\xi = 1 - \frac{(M-m)^2}{2Mm} \ln \frac{M+m}{M-m} = 1 + \frac{(M-m)^2}{2Mm} \ln \frac{M-m}{M+m}$$

Частные случаи

$A=1$
 $\xi=1$ } водород

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}$$

Тяжелые
элементы

$A \gg 1$
 $\xi \approx \frac{2}{A + \frac{2}{3}}$

Значения ξ

Значения ξ для различных веществ для $E_0 = 1$ МэВ и $E_n = 0,04$ эВ – тепловая энергия приведены в таблице

Значения ξ для различных веществ

Ядро	A	ξ	$n = 17/\xi$
H	1	1	17
D	2	0,725	23,5
He	4	0,427	40
Be	9	0,209	81
C	12	0,158	107
O	16	0,119	142
F	56	0.0357	425
U	238	0.0838	1787

Пользуясь величиной ξ , просто вычислить число столкновений n до замедления до некоторой конкретной энергии E_n :

Значения n для замедления от 1 МэВ до 0,004 эВ.

Средняя логарифмическая потеря энергии для смеси ядер

средняя логарифмическая потеря энергии для смеси ядер.
Эта величина аддитивна в следующем смысле:

$$\bar{\xi} \Sigma_s(E) = \sum_i \xi_i \Sigma_{si}(E).$$

Пример: Рассчитать среднюю логарифмическую потерю энергии нейтрона на одно столкновение для воды (H_2O)

Используем выражение для макроскопического сечения рассеяния для воды

$$\Sigma_{SH_2O} = N_{H_2O} (2\sigma_H + \sigma_O)$$

и так же используем макросечения для каждого элемента в отдельности

$$\Sigma_{SH} = 2N_{H_2O} \sigma_{SH}$$

$$\Sigma_{SO} = N_{H_2O} \sigma_{SO}$$

В формуле для расчета ξ сокращаем N_{H_2O} в числителе и знаменателе и получаем

Учитывая табличные значения

$$\sigma_{SH} = 20 \text{ b}$$

$$\sigma_{SO} = 3,8 \text{ b}$$

$$\xi_H = 1$$

$$\xi_O = 0,119$$

Получаем

$$\bar{\xi} = \frac{2 \cdot 1 \cdot \sigma_{SH} + 0,119 \cdot \sigma_{SO}}{\sigma_{SH} + \sigma_{SO}} = 0,924$$

$$\bar{\xi} = \frac{2 \xi_H \sigma_{SH} + \xi_O \sigma_{SO}}{2 \sigma_{SH} + \sigma_{SO}}$$

Замедляющая способность вещества

Σ_s и логарифмический декремент энергии вещества ξ , взятые порознь, являются односторонними характеристиками замедляющих свойств:

Σ_s учитывает только интенсивность рассеяний в единичном объёме вещества,

ξ - только энергетическую сторону процесса замедления на ядрах вещества.

А вот произведение этих двух величин как раз и даёт ответ на вопрос, какой замедлитель является лучшим.

Произведение $\xi\Sigma_s$ - **замедляющая способность вещества**.

По величине замедляющей способности можно сравнивать замедляющие свойства различных

Важно, чтобы замедлитель не только интенсивно замедлял нейтроны, но и не поглощал их в процессе замедления: не будем забывать, что любой нуклид обладает ненулевым микросечением радиационного захвата в диапазоне энергий замедления нейтронов в реакторе. Поэтому при равных величинах замедляющей способности материалов с точки зрения сохранения замедляющихся нейтронов лучшим замедлителем будет тот из них, у которого меньше величина макросечения поглощения надтепловых нейтронов.

Коэффициент замедления вещества - отношение замедляющей способности вещества к его поглощающей способности в интервале энергий замедления (измеряемой величиной среднего значения макросечения поглощения вещества в этом интервале).

$k_z = \xi\Sigma_s/\Sigma_a$, где Σ_s и Σ_a - макросечения замедления и поглощения нейтронов

Характеристики шести лучших природных замедлителей нейтронов

Характеристики	Вещества					
	H ₂ O	D ₂ O	Be	BeO	C	Zr
$\rho, \text{г/см}^3$	1.0	1.10	1.85	2.96	1.6	6.4
ξ	0.926	0.509	0.207	0.174	0.158	0.0218
$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	1.495	0.352	0.749	0.670	0.405	0.344
$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	1.35	0.179	0.155	0.120	0.064	0.0075
k_s	61	1900	125	170	170	0.93
$\tau_T, \text{см}^2$	26.9	118.0	90.0	95.0	297	2082.4

Анализ замедлителей

К числу лучших замедлителей, широко используемых в ядерной физике и ядерной технике для превращения быстрых нейтронов в тепловые, относятся вода, тяжёлая вода, бериллий, графит.

Вода. Достоинства обычной воды, H_2O , как замедлителя - доступность и дешевизна. Она является первым замедлителем по величине замедляющей способности, но по величине коэффициента замедления - на пятом месте, уступая тяжёлой воде, бериллию, оксиду бериллия и графиту потому, что вода обладает более высоким значением макросечения поглощения замедляющихся нейтронов. Недостатки воды – низкая температура кипения и поглощение тепловых нейтронов. Первый недостаток устраняется повышением давления в первом контуре. Поглощение тепловых нейтронов водой компенсируют применением ядерного топлива из обогащённого урана. К недостаткам воды относится то, что в первичных процессах передачи тепла от источника к потребителю вода переносит твёрдые вещества и газы от реактора к другим частям

системы. Замедление нейтронов сопровождается захватом нейтронов и протонов, в результате чего образуются нежелательные радиоактивные примеси. Вода реагирует с реакторными материалами, т.е. Вода обладает химической агрессивностью, особенно при наличии примесей в ней. Большая часть затрат при использовании воды в реакторах обусловлена технологией её приготовления (двойная дистилляция) и необходимостью поддержания в реакторе особого водного режима, направленного на сохранение чистоты воды и создание в ней условий, способствующих минимизации коррозионных процессов в конструкционных материалах. Низкая температура кипения воды при атмосферном давлении ($100^{\circ}C$) заставляет использовать её в энергетических реакторах при относительно высоких ($16-18$ МПа) давлениях.

Вода, как замедлитель, используется в легководных, в основном, водо-водяных реакторах, например, в отечественных ВВЭР.

Тяжёлая вода (HDO) по своим химическим и теплофизическим свойствам мало отличается от обычной воды. Она практически не поглощает нейтронов, что даёт возможность использовать в качестве ядерного топлива природный уран в реакторах с тяжеловодным замедлителем. Недостатки: редкая распространённость в природе, энергоёмкая и дорогостоящая технология получения чистой тяжёлой воды

(0.5% примесей в тяжёлой воде снижают коэффициент замедления её почти на порядок). Тяжёлая вода – замедлитель нейтронов в канадском канальном графито-водном реакторе КАНДУ.

Графит. Графит относится к тяжёлым замедлителям. Применение графита в качестве замедлителя и конструкционного материала в строительстве ядерных реакторов обусловлено его лёгкостью механической обработки, радиационной стойкостью, малым сечением захвата нейтронов (~ 4 мбарн), и довольно хорошей замедляющей способностью, исключительно высокими тепловыми свойствами, термостойкостью и

достаточной прочностью. По величине замедляющей способности графит уступает воде, но коэффициент замедления у него существенно выше. По величине коэффициента замедления K_3 , т. е. отношению замедляющей способности к макроскопическому сечению поглощения, реакторный графит ($K_3=190$) хотя и далёк от D_2O ($K_3=3300$), но близок к Be ($K_3=150$), BeO ($K_3=200$) и значительно выше H_2O ($K_3=61$).

Замедляющая способность графита объясняется его малым ($A=12,01$) атомным весом. Природный графит содержит до 20% различных примесей, в том числе бор, хороший поглотитель. Поэтому природный графит непригоден как замедлитель нейтронов. Реакторный графит получают искусственно из смеси нефтяного кокса и каменноугольной смолы. Технология получения высокоочищенного реакторного графита сложна и

энергоёмка, что обуславливает его высокую стоимость (>10 долл/кг). Нагретый в воздухе до $400^{\circ}C$ графит загорается. Поэтому в энергетических реакторах он содержится в инертной атмосфере: использование для охлаждения графита азотно-гелиевой смеси позволяет поддерживать температуру графитовой кладки не выше $650^{\circ}C$. Ещё один недостаток графита связан с тем, что при облучении в ядерном реакторе свойства

графита значительно изменяются вследствие смещения быстрыми нейтронами атомов углерода из узлов кристаллической решетки и создания в ней структурных изменений.

Графит применяется в промышленных реакторах, предназначенных для наработки оружейного плутония и энергетических графито-водяных реакторах, например, в РБМК.

Бериллий. Бериллий один из лучших замедлителей. Он имеет высокую температуру плавления ($1282^{\circ}C$) и теплопроводность, совместим с углекислым газом, водой, воздухом и некоторыми жидкими металлами. Однако, при этом концентриация делящихся нуклидов в ядерном топливе должна быть достаточно высокой, т. е. оно должно быть обогащенным. Это обусловлено большим сечением поглощения нейтронов в обычной воде. Коэффициент замедления графита в 3 раза больше, чем легкой воды, но значительно ниже по сравнению с тяжелой водой. Поэтому в реакторах с графитовым замедлителем критическая масса меньше, чем в легководных реакторах, но больше, чем в тяжеловодных. Замедляющая же способность графита наименьшая из этих трех замедлителей. Таким образом, активные зоны реакторов с графитовым замедлителем имеют наибольшие размеры. В них используют топливо с низким обогащением по делящемуся нуклиду.

ограничено его высокой стоимостью. Из бериллия изготавливают отражатели и вытеснители воды в активной зоне исследовательских реакторов, он также используется в некоторых видах атомного оружия. Бериллий и оксид бериллия не получили широкого распространения в качестве замедлителя для энергетических реакторов из-за его высокой стоимости и малой радиационной стойкости.

Итак, наилучшей замедляющей способностью обладает обычная (легкая) вода вследствие большого сечения рассеяния тепловых нейтронов. Поэтому в легководных реакторах размеры активной зоны наименьшие. Однако при этом концентрация делящихся нуклидов в ядерном топливе должна быть достаточно высокой, т. е. оно должно быть обогащенным. Это обусловлено большим сечением поглощения нейтронов в обычной воде. Коэффициент замедления графита в 3 раза больше, чем легкой воды, но значительно ниже по сравнению с тяжелой водой. Поэтому в реакторах с графитовым замедлителем критическая масса меньше, чем в легководных реакторах, но больше, чем в тяжеловодных. Замедляющая же способность графита наименьшая из этих трех замедлителей. Таким образом, активные зоны реакторов с графитовым замедлителем имеют наибольшие размеры. В них используют топливо с низким обогащением по делящемуся нуклиду.