

Лекция 4. Замедление и диффузия нейтронов

- Процесс снижения средней кинетической энергии нейтронов при рассеянии на ядрах называют **замедлением**. Рассеяние нейтронов на ядрах может быть **упругим или неупругим**.
Упругое рассеяние происходит с сохранением суммарной кинетической энергии нейтрона и ядра.
- Потерю энергии нейтроном $E_1 - E_2$ при одном упругом рассеянии обычно характеризуют средней логарифмической потерей энергии (*параметром замедления*)
$$\xi = \langle \ln (E_1/E_2) \rangle \approx 2/(A + 2/3)$$
- Используя ξ , можно рассчитать *среднее число столкновений* $n_{\text{зам}}$ нейтрона с ядрами, которое приводит к его замедлению от начальной энергии до тепловой области (E_T):
$$n_{\text{зам}} = \ln(E_0/E_T) / \xi.$$

- Для выбора веществ, которые могут быть использованы в качестве замедлителей, **вводят понятие замедляющей способности**, показывающее не только значение средней потери энергии при одном столкновении, но также учитывающее число таких столкновений в единичном объеме вещества.
- Произведение $\xi \Sigma_s$, где Σ_s — макроскопическое сечение рассеяния, учитывает оба вышеуказанных фактора, поэтому его значение характеризует замедляющую способность вещества.
- Чем выше значение $\xi \Sigma_s$, тем быстрее замедляются нейтроны и тем меньший объем вещества нужен для замедления нейтронов.

- **ЗАМЕДЛИТЕЛЬ** должен обладать минимальной поглощающей способностью в области тепловых энергий, а *поглощающую способность* вещества характеризует величина $\Sigma_{a,T}$. Поэтому **основной характеристикой** веществ, используемых в качестве замедлителя, является **коэффициент замедления** $k_{зам}$, который показывает способность вещества не только замедлять нейтроны, но и сохранять их после замедления:
- $k_{зам} = \xi \Sigma_s / \Sigma_{a,T}$.
- Чем больше $k_{зам}$, тем интенсивнее накапливаются тепловые нейтроны в замедлителе ввиду большой замедляющей способности вещества и слабого поглощения в нем нейтронов.
- **Вещества, имеющие высокие значения $k_{зам}$, являются самыми эффективными замедлителями (см. табл. 2.2).**
- Наилучшим замедлителем является тяжелая вода, однако высокая стоимость тяжелой воды ограничивает ее применение. Поэтому **широкое распространение в качестве замедлителей получили обычная (легкая) вода и графит.**

- В процессе замедления до тепловой области нейтрон испытывает большое число столкновений, при этом происходит его среднее смещение (по прямой) на расстояние $\langle r_{\text{зам}} \rangle$ от места генерации (см.рис.2.8.).
- Величину $L_s = [1/6 \langle r_{\text{зам}}^2 \rangle]^{1/2}$ называют **длиной замедления**, а квадрат длины замедления — **возрастом нейтронов** τ .
- Нейтроны после своего замедления до тепловой области относительно длительное время хаотическим образом перемещаются в среде, обмениваясь кинетической энергией при столкновениях с окружающими ядрами.
- Такое движение нейтронов в среде, когда их энергия в среднем остается постоянной, называют **диффузией**.
- Диффузионное движение теплового нейтрона продолжается до тех пор, пока не произойдет его поглощения.
- В процессе диффузии тепловой нейтрон смещается от места своего рождения до места поглощения в среднем на расстояние $\langle r_{\text{диф}} \rangle$.
- Величину $L = [1/6 \langle r_{\text{диф}}^2 \rangle]^{1/2}$ называют **длиной диффузии** тепловых нейтронов.
- Среднее расстояние, на которое смещается нейтрон от места своего рождения (быстрым) до места своего поглощения (тепловым), характеризуют **длиной миграции** M :
- $M^2 = \tau + L^2$.

Таблица 2.2. Свойства замедлителей.

Вещество	$\xi \Sigma_s, \text{м}^{-1}$	$k_{\text{зам}}$	$\tau \cdot 10^{-2}, \text{м}^2$	$L, \text{м}$	$M, \text{м}$
Легкая вода	135	61	0,273	0,027	0,059
Тяжелая вода	18,8	5700	1,25	1,6	1,61
Графит	6,1	205	3,52	0,52	0,56

3.3. Разделение диапазона энергий нейтронов в ядерном реакторе

Из всего многообразия процессов, происходящих при взаимодействии нейтронов с ядрами, для работы ядерного реактора важны три: деление, радиационный захват и рассеяние. Сечения этих взаимодействий и соотношения между ними существенно зависят от энергии нейтронов. Обычно выделяются интервалы энергии быстрых ($10\text{МэВ}-1\text{кэВ}$), промежуточных или резонансных ($1\text{кэВ}-0,625\text{эВ}$) и тепловых нейтронов ($0,625\text{эВ}-10^{-5}\text{эВ}$). Нейтроны, образующиеся при делении ядер в реакторах, имеют энергии выше нескольких кило электрон вольт, т.е. все они относятся к быстрым нейтронам.

Тепловые нейтроны называются так потому, что они находятся в тепловом равновесии с веществом реактора (в основном, замедлителя), т.е. средняя энергия их движения приблизительно соответствует средней энергии теплового движения атомов и молекул замедлителя.

Рис.3.1. Схема замедления и диффузии нейтронов.

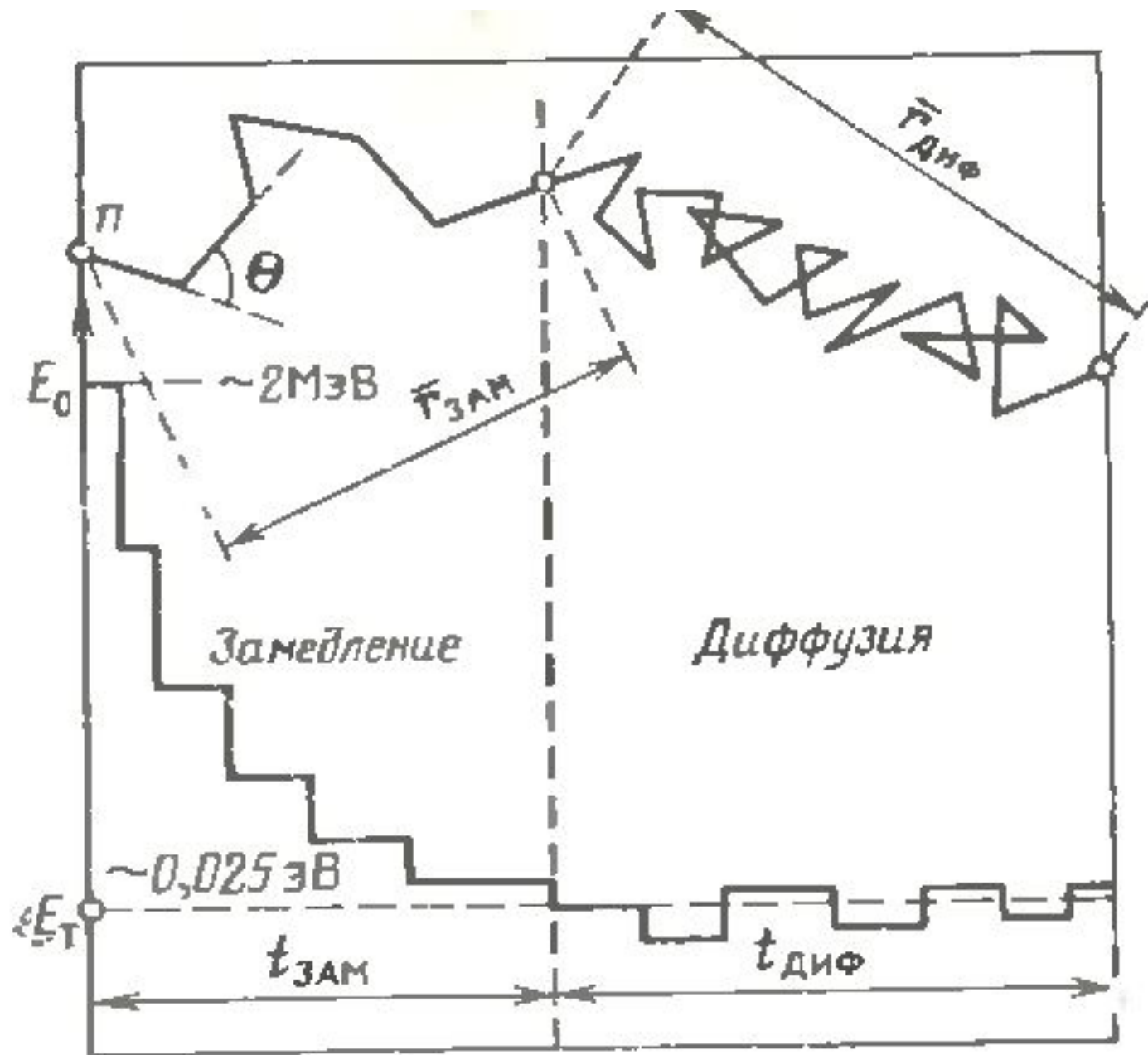


Таблица 3.1. *Время замедления, диффузии и полное время жизни нейтрона в чистом замедлителе*

Замедлитель	Плотность	Время замедления , мкс	Время диффузии в чистом замедлителе, мс
Лёгкая вода	1.0	10	0.23
Тяжёлая вода	1.1	50	116
Бериллий	1.85	70	5
Графит	1.6	150	17

- Как видно, для всех замедлителей время диффузии значительно больше времени замедления, причём наибольшая разница имеет место для тяжёлой воды.
- Это означает, что в большом объёме замедлителя число нейтронов с тепловой энергией приблизительно в 100 раз больше числа всех остальных нейтронов с более высокой энергией.

- **Конструкционные материалы и топливо слабо замедляют нейтроны по сравнению с тяжёлой или легкой водой.**
- **В графитовых реакторах объём замедлителя в ячейке значительно превосходит объём ТВС, и возраст нейтронов в реакторе близок к возрасту нейтронов в графите**

Коэффициент размножения

- Для анализа цепной реакции деления вводят *коэффициент размножения*, показывающий отношение числа нейтронов n_i любого поколения к их числу n_{i-1} в предыдущем поколении:
- $k = n_i / n_{i-1}$

ФАЗЫ ЗАМКНУТОГО НЕЙТРОННОГО ЦИКЛА

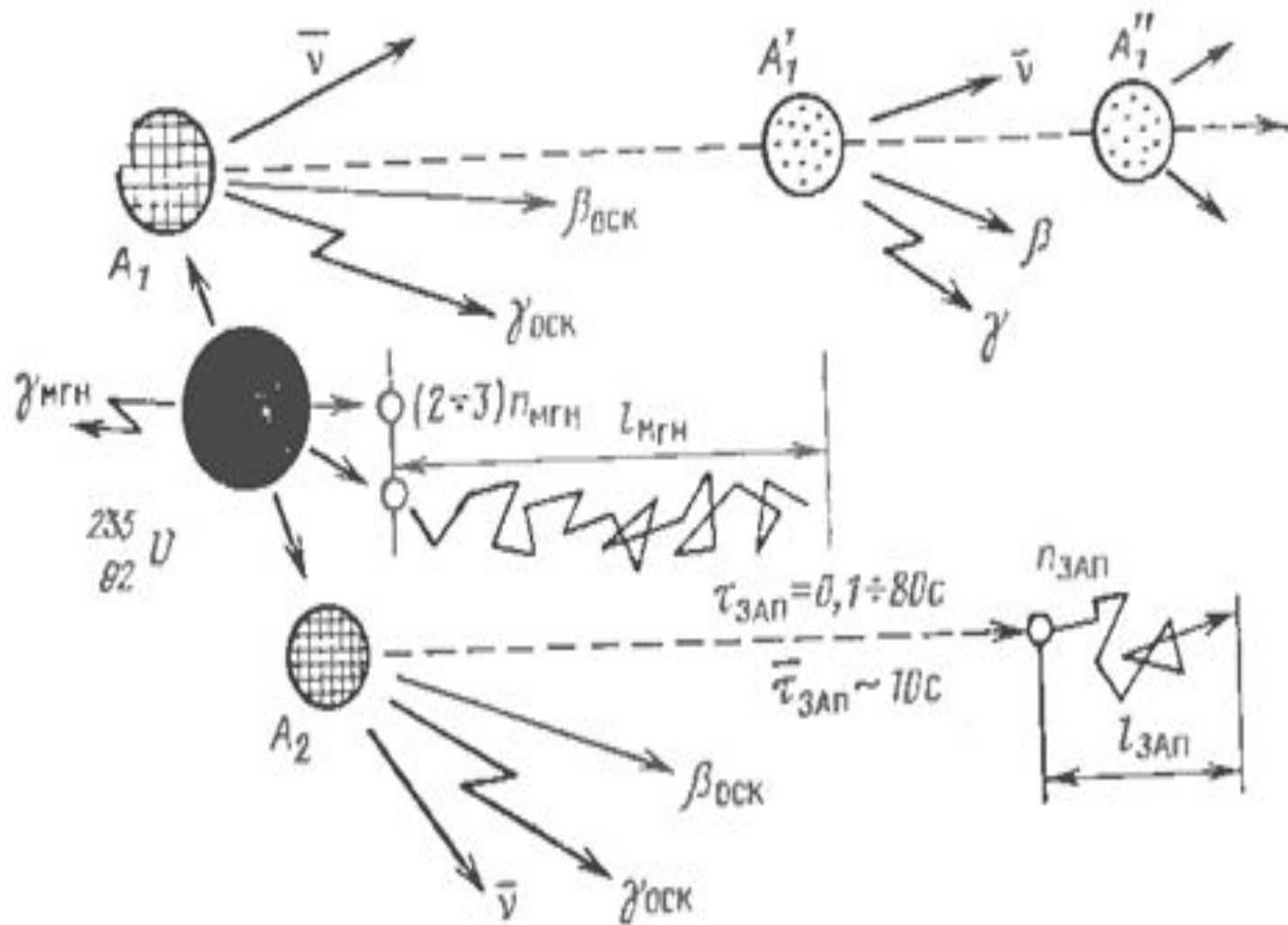
- **Значение k_{∞} в размножающей среде, содержащей ядерное топливо и замедлитель, определяется участием нейтронов в следующих четырех процессах, представляющих различные фазы замкнутого нейтронного цикла:**
 - **1) деление на тепловых нейтронах,**
 - **2) деление на быстрых нейтронах,**
 - **3) замедление быстрых нейтронов до тепловой области,**
 - **4) диффузия тепловых нейтронов до поглощения в ядерном топливе**

1. Деление на тепловых нейтронах (10^{-14} с).

- 1) Деление на тепловых нейтронах характеризуется **коэффициентом деления на тепловых нейтронах η** , который показывает число образующихся вторичных нейтронов на один поглощенный тепловой нейтрон. Значение η зависит от свойств делящегося вещества и его содержания в ядерном топливе:
- $\eta = \nu \sigma_{f5} / (\sigma_{f5} + \sigma_{\gamma5} + \sigma_{\gamma8} N_8 / N_5)$.
- Снижение η по сравнению с числом ν вторичных нейтронов, возникающих при делении), обусловлено радиационным захватом нейтронов ядрами ^{235}U и ^{238}U , имеющими концентрации N_5 и N_8 соответственно (для краткости в нижнем индексе будем указывать последнюю цифру массового числа нуклида).
-

- Для нуклида ^{235}U ($\sigma_{f5} = 583,5$ б, $\sigma_{\gamma5} = 97,4$ б, $N_8 = 0$) значение $\eta = 2,071$. Для естественного урана ($N_8/N_5 = 140$) имеем $\eta = 1,33$.

Рис. 3.2. Схема деления ядра урана (плутония).



2. Деление на быстрых нейтронах (10^{-14} с.).

- Часть рождающихся при делении вторичных нейтронов имеет энергию больше энергии порога деления ^{238}U . Это вызывает деление ядер ^{238}U .
- Однако после нескольких столкновений с ядрами замедлителя энергия нейтронов становится ниже этого порога и деление ядер ^{238}U прекращается.
- Поэтому **размножение нейтронов за счет деления ^{238}U наблюдается только при первых столкновениях родившихся быстрых нейтронов с ядрами ^{238}U .**
- **Число образующихся вторичных нейтронов на один поглощенный быстрый нейтрон характеризуется *коэффициентом деления на быстрых нейтронах* μ .**

3. Замедление быстрых нейтронов до тепловой области (10^{-4} с)

- В резонансной области энергий основным поглотителем замедляющихся нейтронов являются ядра ^{238}U . **Вероятность избежать резонансного поглощения (коэффициент ϕ)** связана с плотностью N_8 ядер ^{238}U и замедляющей способностью среды $\xi\Sigma_s$ соотношением
- $\phi = \exp[- N_8 I_{a,\text{эф}} / (\xi\Sigma_s)]$.
- Величину $I_{a,\text{эф}}$, характеризующую поглощение нейтронов отдельным ядром ^{238}U в резонансной области энергий, называют **эффективным резонансным интегралом**.

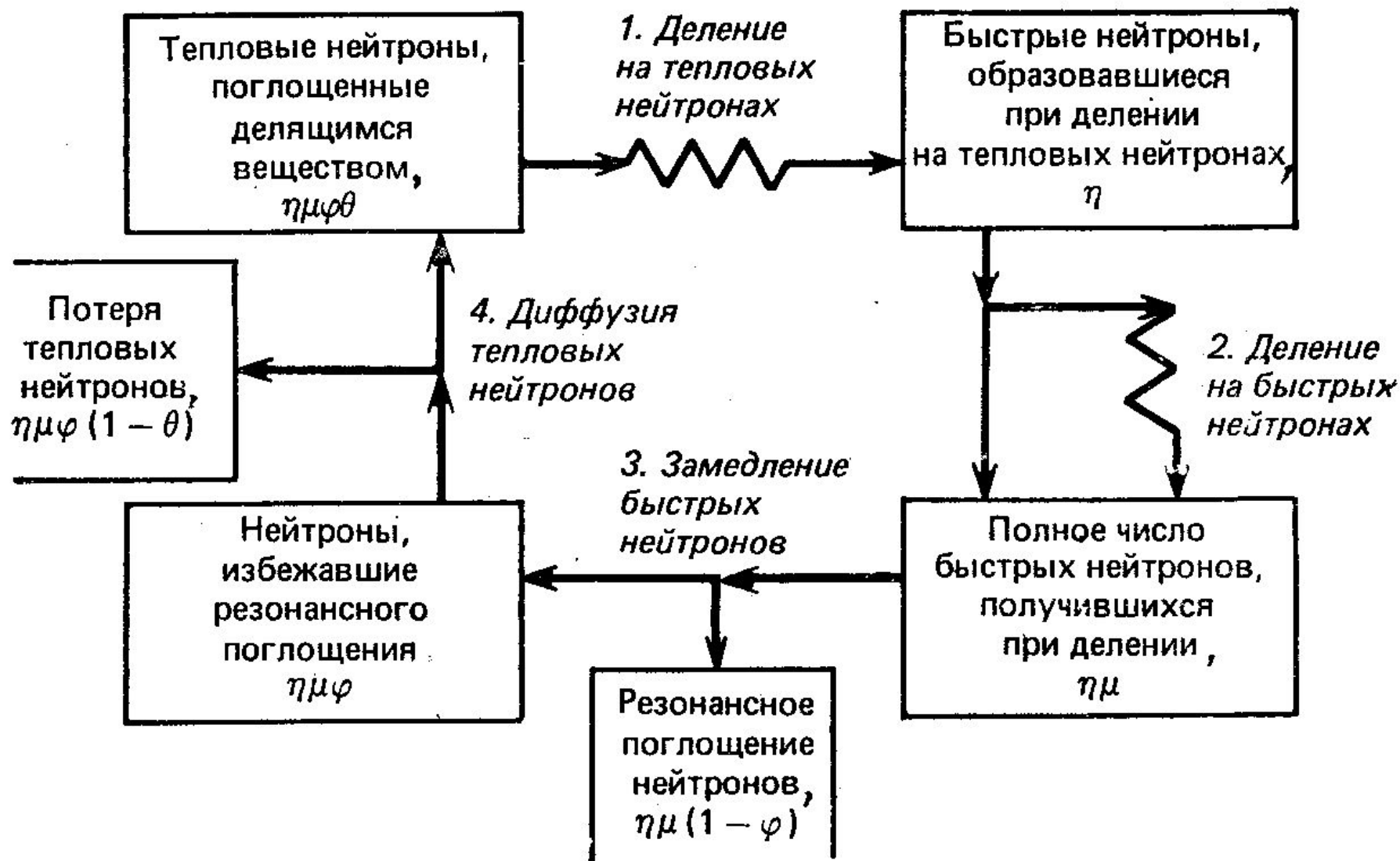
- Чем больше концентрация ядер ^{238}U (или ядерного топлива $N_{\text{ят}}$) по сравнению с концентрацией $N_{\text{зам}}$ ядер замедлителя ($\xi \Sigma_s = \xi \sigma_s N_{\text{зам}}$), тем меньше значение φ

- Диффузия тепловых нейтронов до поглощения в ядерном топливе (10^{-3} с).
- Нейтроны, достигшие тепловой области, поглощаются либо ядрами топлива, либо ядрами замедлителя. **Вероятность захвата тепловых нейтронов ядрами топлива называют коэффициентом использования тепловых нейтронов θ .**

$$\theta = \frac{\Sigma_{a, \text{ят}} \Phi_{\text{ят}}}{\Sigma_{a, \text{ят}} \Phi_{\text{ят}} + \Sigma_{a, \text{зам}} \Phi_{\text{зам}}} = \frac{\Sigma_{a, \text{ят}}}{\Sigma_{a, \text{ят}} + \Sigma_{a, \text{зам}}} \cdot \frac{\Phi_{\text{ят}}}{\Phi_{\text{зам}}}.$$

- **Рассмотренные четыре процесса определяют баланс нейтронов в размножающей системе (см. рис. 3.3).**
- В результате поглощения одного теплового нейтрона любого поколения в следующем поколении появляется $\eta\mu\phi\theta$ нейтронов.
- Таким образом, **коэффициент размножения в бесконечной среде количественно выражается формулой четырех сомножителей:**
- $k_{\infty} = n \eta\mu\phi\theta / n = \eta\mu\phi\theta.$

Рис. 3.3 Нейтронный цикл цепной реакции деления на тепловых нейтронах в критическом состоянии ($k_{\infty} = \eta\mu\phi\theta = 1$)



- Первые два коэффициента зависят от свойств используемого ядерного топлива и характеризуют рождение нейтронов в процессе цепной реакции деления.
- Коэффициенты ϕ и θ характеризуют полезное использование нейтронов, однако их значения зависят от концентраций ядер замедлителя и топлива противоположным способом.
- Поэтому произведение $\phi\theta$ и, следовательно, k_{∞} , имеют максимальные значения при оптимальном отношении $N_{\text{зам}}/N_{\text{ят}}$.

- цепную реакцию деления можно осуществить с использованием разных видов ядерного топлива и замедлителя:
 - 1) естественного урана с тяжеловодным или графитовым замедлителем;
 - 2) слабообогащенного урана с любым замедлителем;
 - 3) сильнообогащенного урана или искусственного ядерного топлива (плутония) без замедлителя (цепная реакция деления на быстрых нейтронах).