

# 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  $\xi$ , 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  $\Sigma_s$  — 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**  $\tau$ .
- 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.

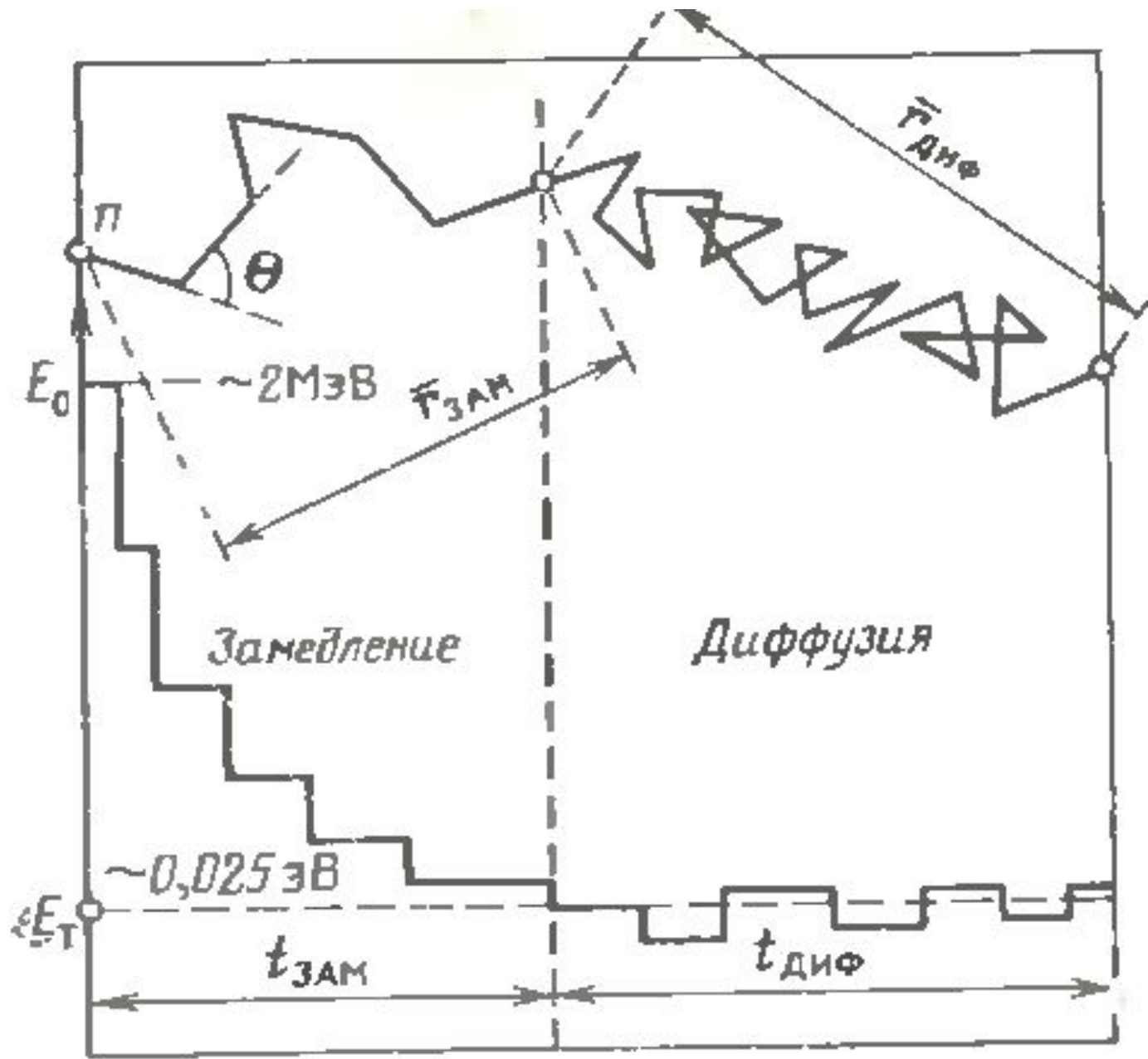
Вещество	$\xi \Sigma_s, \text{M}^{-1}$	$k_{\text{зам}}$	$\tau \cdot 10^{-2}, \text{M}^2$	$L, \text{M}$	$M, \text{M}$
Легкая вода	135	61	0,273	0,027	0,059
Тяжелая вода	18,8	5700	1,25	1,6	1,61
Графит	6,1	205	3,52	0,52	0,56

### 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 МэВ-1 кэВ), промежуточных или резонансных (1 кэВ-0,625 эВ) и тепловых нейтронов (0,025 эВ). Нейтроны, образующиеся при делении ядер в реакторах, имеют энергии выше нескольких килоэлектрон 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, $\mu$ кс	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

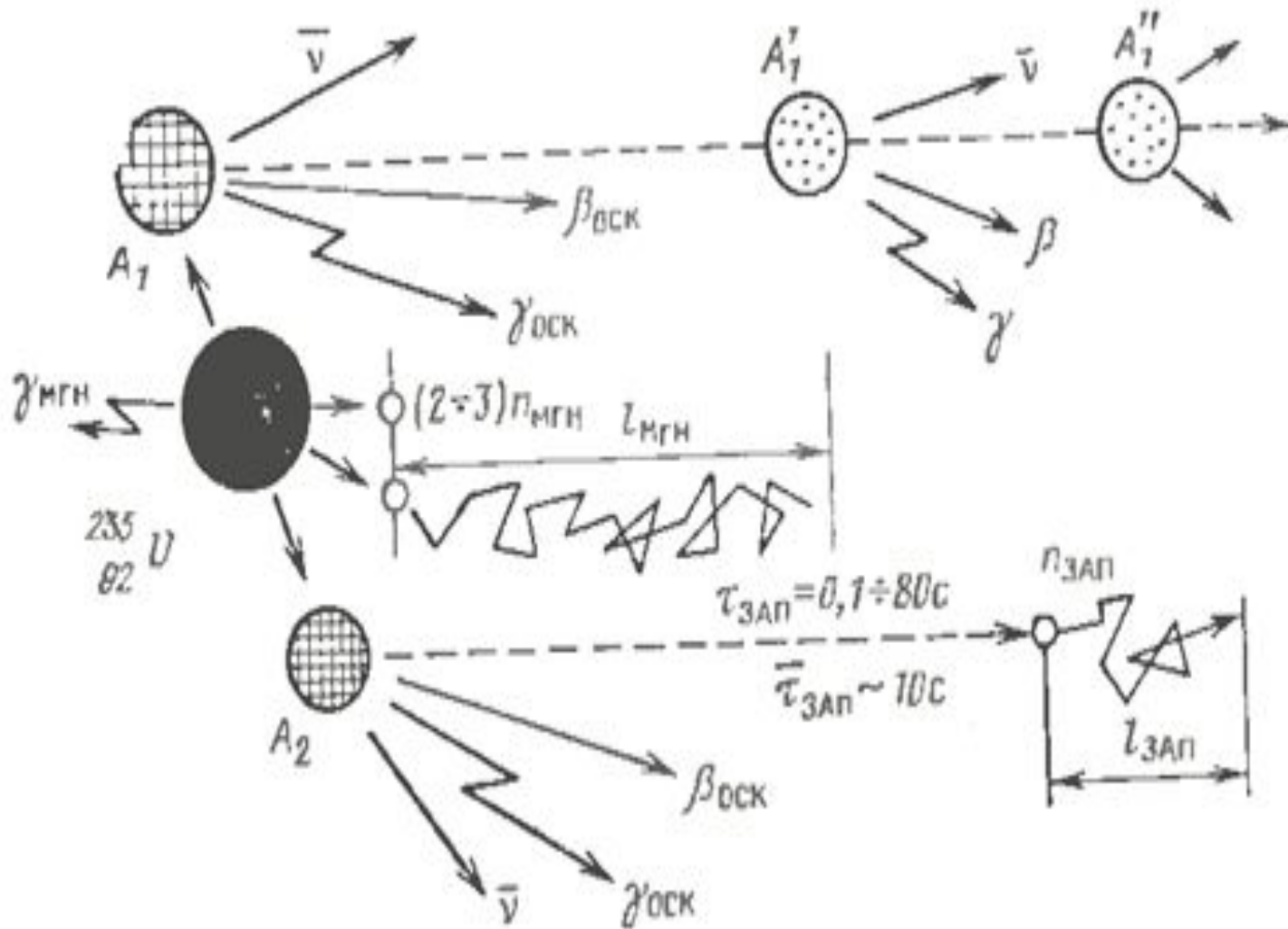
- **Значение  $k_{\infty}$  в размножающей среде, содержащей ядерное топливо и замедлитель, определяется участием нейтронов в следующих четырех процессах, представляющих различные фазы замкнутого нейтронного цикла:**
  - **1) деление на тепловых нейтронах,**
  - **2) деление на быстрых нейтронах,**
  - **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  $\eta$** , который показывает число образующихся вторичных нейтронов на один поглощенный тепловой нейтрон. Значение  $\eta$  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  $\eta$  по сравнению с числом  $\nu$  вторичных нейтронов, возникающих при делении), обусловлено радиационным захватом нейтронов ядрами  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , имеющими концентрации  $N_5$  и  $N_8$  соответственно (для краткости в нижнем индексе будем указывать последнюю цифру массового числа нуклида).
  -

- Для нуклида  $^{235}\text{U}$  ( $\sigma_{f5} = 583,5$  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  $^{238}\text{U}$ . Это вызывает деление ядер  $^{238}\text{U}$ .
- Однако после нескольких столкновений с ядрами замедлителя энергия нейтронов становится ниже этого порога и деление ядер  $^{238}\text{U}$  прекращается.
- Поэтому **размножение нейтронов за счет деления  $^{238}\text{U}$  наблюдается только при первых столкновениях родившихся быстрых нейтронов с ядрами  $^{238}\text{U}$ .**
- **Число образующихся вторичных нейтронов на один поглощенный быстрый нейтрон характеризуется коэффициентом деления на быстрых нейтронах  $\mu$ .**



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

- В резонансной области энергий основным поглотителем замедляющихся нейтронов являются ядра  $^{238}\text{U}$ . Вероятность избежать резонансного поглощения (*коэффициент  $\phi$* ) связана с плотностью  $N_8$  ядер  $^{238}\text{U}$  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  $^{238}\text{U}$  в резонансной области энергий, называют ***эффективным резонансным интегралом***.

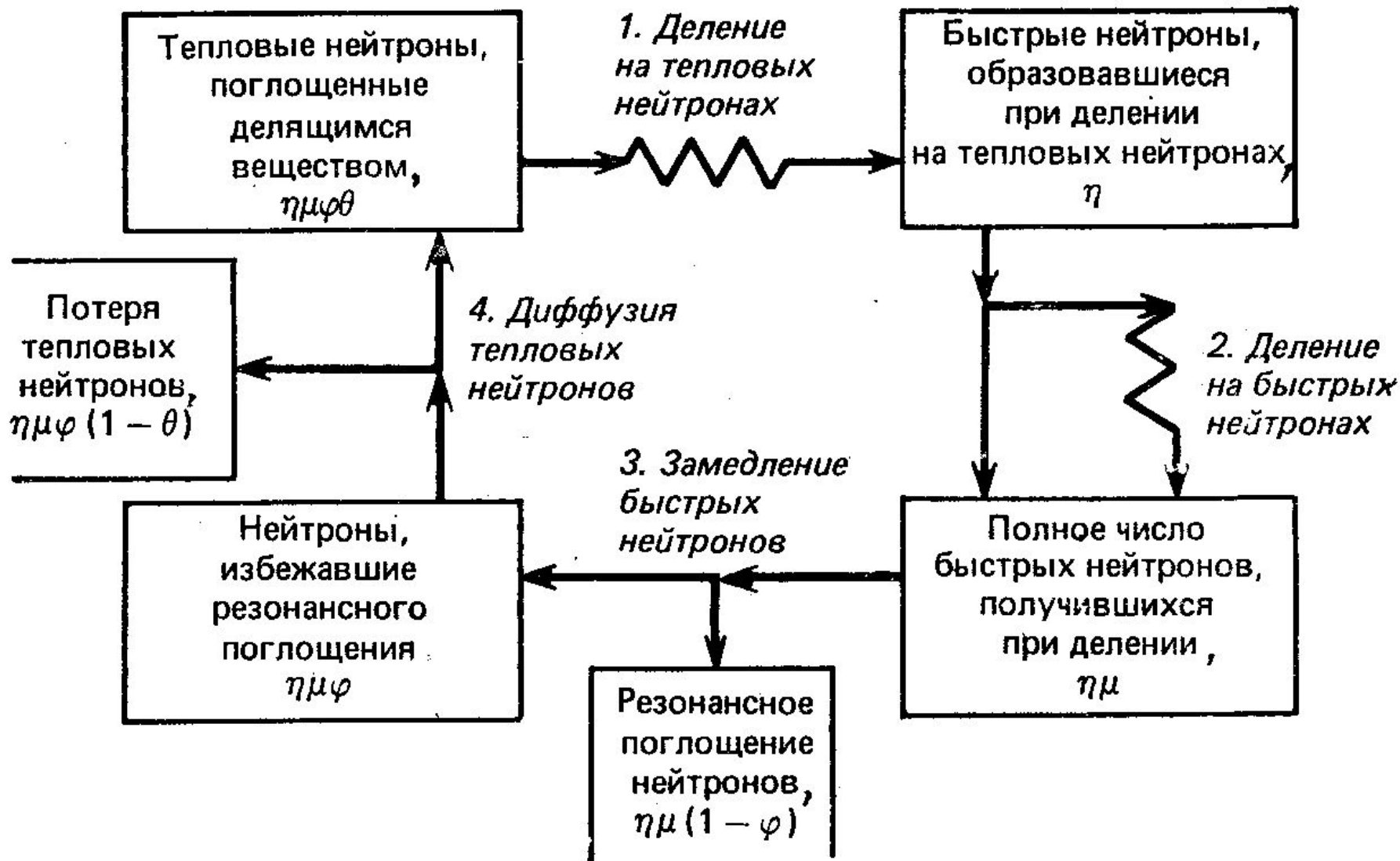
- Чем больше концентрация ядер  $^{238}\text{U}$  (или ядерного топлива  $N_{\text{ЯТ}}$ ) по сравнению с концентрацией  $N_{\text{зам}}$  ядер замедлителя ( $\xi\Sigma_s = \xi\sigma_s N_{\text{зам}}$ ), тем меньше значение  $\varphi$

- 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  $\theta$ .**

- $$\theta = \frac{\sum_{\text{а,ят}} \Phi_{\text{ят}}}{\sum_{\text{а,ят}} \Phi_{\text{ят}} + \sum_{\text{а,зам}} \Phi_{\text{зам}}} = \frac{\sum_{\text{а,ят}} \Phi_{\text{ят}}}{\sum_{\text{а,ят}} \Phi_{\text{ят}} + \sum_{\text{а,зам}} \Phi_{\text{зам}} / \Phi_{\text{ят}}}$$

- **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  $\phi$  и  $\theta$  характеризуют полезное использование нейтронов, однако их значения зависят от концентраций ядер замедлителя и топлива противоположным способом.
- Поэтому произведение  $\phi\theta$  и, следовательно,  $k_{\infty}$ , 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).