

The background of the slide is a dynamic, abstract composition of light rays. A central, bright white and yellow point of light radiates outwards, creating a starburst effect. The rays are primarily in shades of blue and white, with some darker blue tones towards the edges. The overall effect is one of energy and movement, suggesting a high-tech or scientific theme.

КРИТИЧНОСТЬ РЕАКТОРА И УСЛОВИЯ ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ

Мощность реактора

Мощность реактора:

$$N_p = 3,204 \cdot 10^{-11} R_f^5 \cdot V_m$$

Скорость реакции деления U^{235} :

$$R_f^5 = \nu \cdot \Sigma_f^5 \cdot n$$

Величины, **постоянные** для каждого конкретного реактора:

$$3,204 \cdot 10^{-11} \cdot \nu \cdot V_m \cdot \Sigma_f^5 = C_N$$

Мощность реактора прямопропорциональна средней по объёму топлива плотности нейтронов в его активной зоне:

$$N_p = C_N \cdot n$$

n - средняя по объёму топливной композиции величина плотности тепловых нейтронов

Изменение мощности реактора зависит от изменения плотности нейтронов в нем

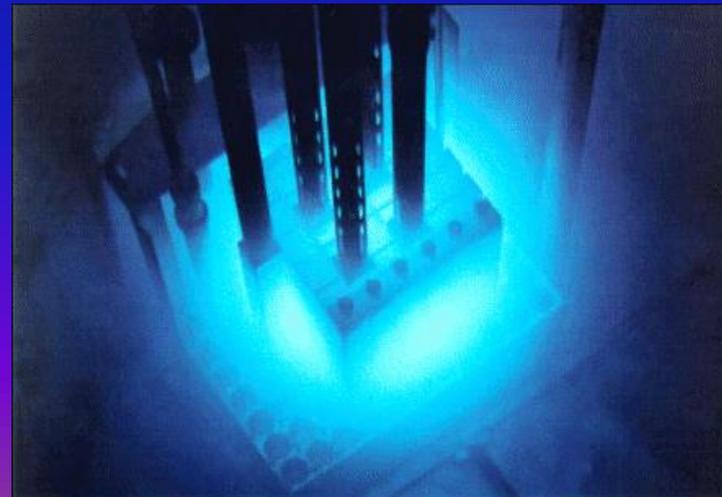
Критичность реактора

Чтобы реактор работал на постоянном уровне мощности, необходимо создать и поддерживать в его активной зоне такие условия, чтобы **плотность нейтронов была постоянной во времени**

Это состояние реактора принято называть *критичностью*.

Критичность реактора – это рабочее его состояние, в котором средняя по объёму топлива плотность нейтронов в нём постоянна во времени

Реактор может быть критичен на любом уровне мощности



Условие критичности

Каждому значению плотности нейтронов $n(t) = const$ соответствует свой постоянный уровень мощности реактора $N_p(t) = const$.

Условие критичности: $dn/dt = 0$

Скорость изменения во времени плотности нейтронов в реакторе должна быть нулевой.

Скорость изменения плотности нейтронов – разница скоростей их появления и исчезновения в единичном объёме

Уравнение баланса плотности нейтронов в активной зоне:

$$dn/dt = \text{генерация} - \text{поглощение} - \text{утечка}$$

Баланс нейтронов

«Прибыль» нейтронов:

- генерация быстрых нейтронов из реакции деления;
- замедление нейтронов более высоких энергий до более низких уровней.

«Убыль» нейтронов:

- ядерная реакция поглощения: $R_a^i = \Sigma_a^i \cdot \Phi$
- «утечка» нейтронов за пределы активной зоны
скорость нейтронов – $v_n = 2200 \text{ м/с}$
- замедление с данного уровня энергии в область более низких энергий

Безопасное управление мощностью реактора – обеспечение критического состояния реактора

Поколение нейтронов

Свободный нейтрон испытывает:

- рождение,
- пространственный перенос,
- гибель в результате поглощения.

Все события носят вероятностный характер.

Поколение нейтронов – совокупность нейтронов, рождаемых в активной зоне одновременно или в очень короткий (по сравнению со временем их свободного существования) промежуток времени.

Упрощение: исследуется влияние физических свойств среды на один среднестатистический нейтрон.

Критичность и мощность реактора

Если плотности нейтронов различных поколений равны, то реактор **критичен**, мощность не изменяется:

$$n_1 = n_2 = n_3 = \dots = n_{i-1} = n_i = n_{i+1}$$

Если плотность нейтронов от поколения к поколению возрастает, то реактор **надкритичен**, мощность растёт:

$$n_1 < n_2 < n_3 < \dots < n_{i-1} < n_i < n_{i+1}$$

Если плотность нейтронов последовательно сменяющих друг друга поколений уменьшается, то реактор **подкритичен**, мощность падает:

$$n_1 > n_2 > n_3 > \dots > n_{i-1} > n_i > n_{i+1}$$

Оценка состояния реактора

Эффективный коэффициент размножения – отношение числа нейтронов рассматриваемого и непосредственно предшествующего ему поколений:

$$k_{эфф} = n_i / n_{i-1} = n_{i+1} / n_i$$

$k_{эфф} = 1$ реактор критичен; $k_{эфф} > 1$ реактор надкритичен;

$k_{эфф} < 1$ реактор подкритичен.

Избыточный коэффициент размножения – превышение величины эффективного коэффициента размножения над единицей:

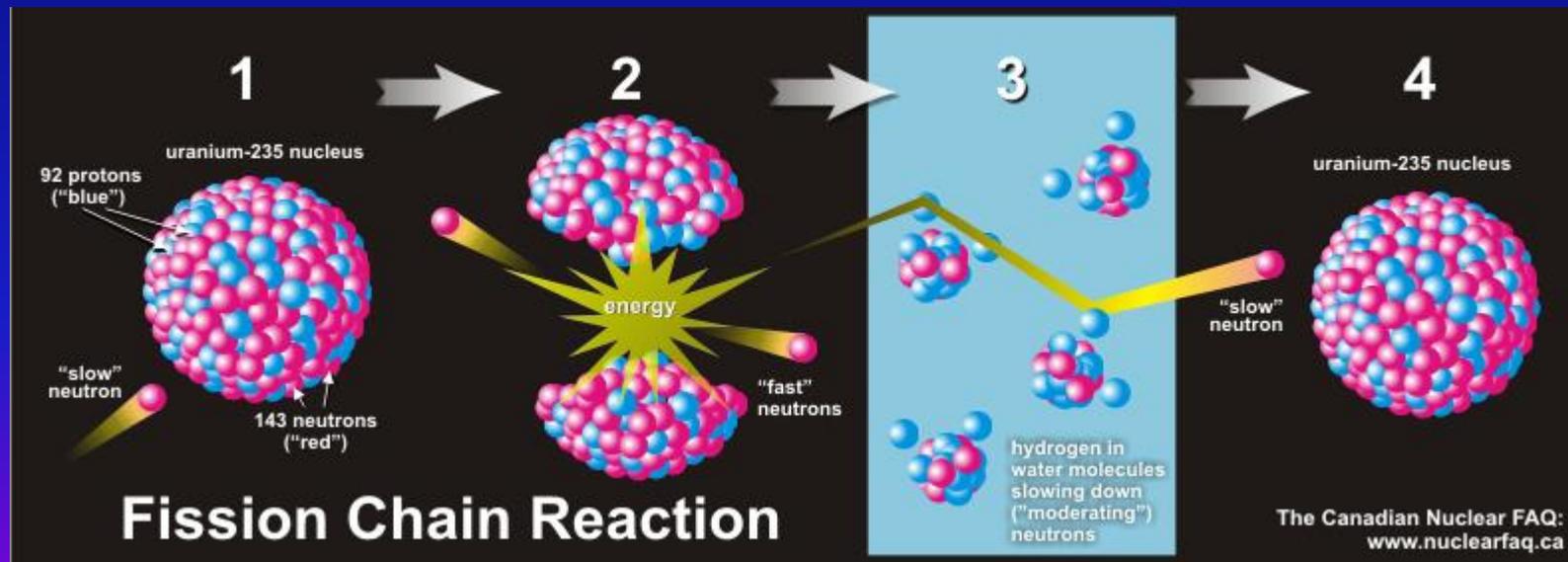
$$\delta k_{эфф} = k_{эфф} - 1$$

Реактивность реактора – отношение величин избыточного коэффициента размножения к эффективному:

$$\rho = \delta k_{эфф} / k_{эфф} = 1 - 1/k_{эфф}$$

Цепная реакция деления в тепловом ЯР

Тепловой ядерный реактор – реактор, в котором подавляющее большинство делений ядер осуществляется тепловыми нейтронами.



Нейтронный цикл в тепловом ЯР

Нейтронный цикл – совокупность физических процессов, которые повторяются в пределах среднего времени жизни каждого поколения.

Основные физические процессы нейтронного цикла в тепловом реакторе:

- 1. Рождение свободных нейтронов**
- 2. Замедление нейтронов**
- 3. Диффузия тепловых нейтронов**
- 4. Поглощение**



Рождение свободных нейтронов

Нейтроны рождаются в результате реакции деления ядер топлива: ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu

Все нейтроны деления рождаются быстрыми ($E > 0.1$ МэВ)

Энергетическое распределение нейтронов деления описывается спектром Уатта:

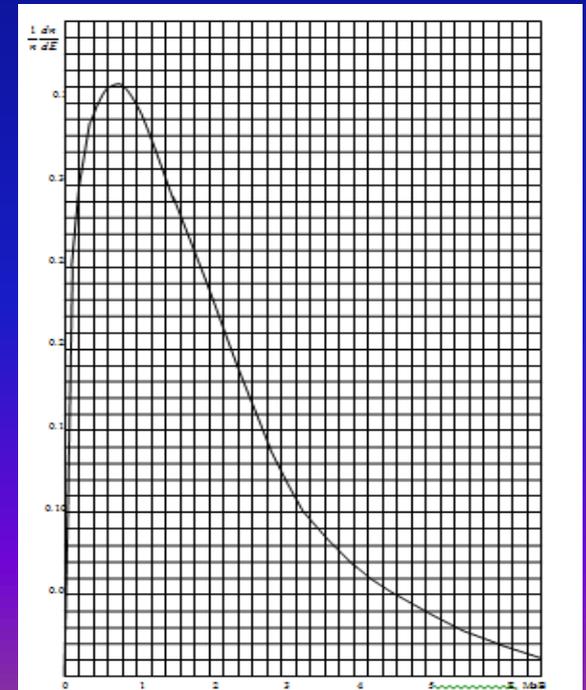
- Наиболее вероятная энергия:

$$E_{нв} = 0,7104 \text{ МэВ}$$

- Средняя энергия:

$$E_{ср} = 1,935 \text{ МэВ} - \text{для } ^{235}\text{U}$$

$$E_{ср} = 2,00 \text{ МэВ} - \text{для } ^{239}\text{Pu}$$



Замедление нейтронов

Замедление нейтронов – пространственный перенос нейтронов в среде активной зоны, сопровождающийся уменьшением их кинетической энергии за счёт реакций рассеяния на ядрах этой среды.

Особенности замедления:

- источником движения нейтронов является начальная кинетическая энергия, с которой рождаются в делениях быстрые нейтроны;
- нейтроны движутся прямолинейно и равномерно, пока не встречают ядра, с которыми вступают во взаимодействия (рассеяние);
- в результате рассеяния нейтрон теряет свою кинетическую энергию и меняет направление движения;

Замедление нейтронов

Особенности замедления:

- во время серии последовательных рассеяний нейтрон описывает пространственную ломаную линию, состоящую из приблизительно одинаковых отрезков – длина свободного пробега рассеяния:

$$\lambda_s = 1/\Sigma_j^i$$

- нейтроны в процессе замедления движутся с большими скоростями, приводящими к утечке части замедляющихся нейтронов за пределы активной зоны;
- в конце процесса замедления, в интервале энергий от 600 до 6 эВ, неизбежна также потеря ещё части замедляющихся нейтронов за счёт резонансного захвата их ядрами ^{238}U .

Диффузия нейтронов

Диффузия тепловых нейтронов – пространственный перенос тепловых нейтронов в среде при постоянном среднем значении их кинетической энергии.

Особенности диффузии:

- источником движения тепловых нейтронов в процессе диффузии является кинетическая энергия ядер среды, в которой они движутся, поскольку ядра сами находятся в состоянии теплового движения;
- значение кинетической энергии нейтронов и ядер определяется температурой среды;

Диффузия нейтронов

- тип взаимодействия нейтронов с ядрами определяется материалом активной зоны, в объёме которого происходит диффузия:
 - в замедлителях – рассеяние,
 - в поглотителях – радиационный захват
- при диффузии пространственный путь теплового нейтрона представляет собой ломаную линию;
- скорости тепловых нейтронов достаточно высоки (> 2.2 км/с), что также обуславливает утечку тепловых нейтронов за пределы активной зоны реактора.

Поглощение нейтронов

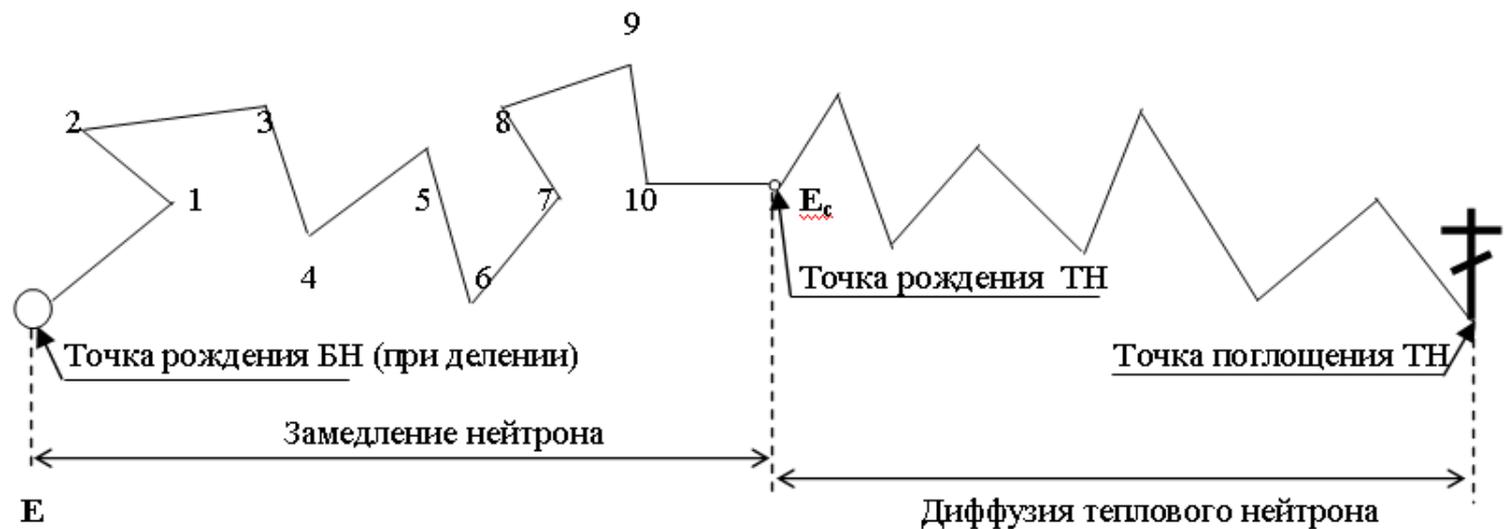
Процесс диффузии тепловых нейтронов всегда завершается **поглощением** их ядрами среды активной зоны.

Потенциально-созидательное поглощение:

- поглощение делящимися ядрами, приводящее к делению и рождению новых нейтронов

Бесполезное поглощение:

- поглощение неделящимися ядрами любого другого, кроме топлива, материала активной зоны, приводящее к непроизводительной потере тепловых нейтронов



Энергия сшивки

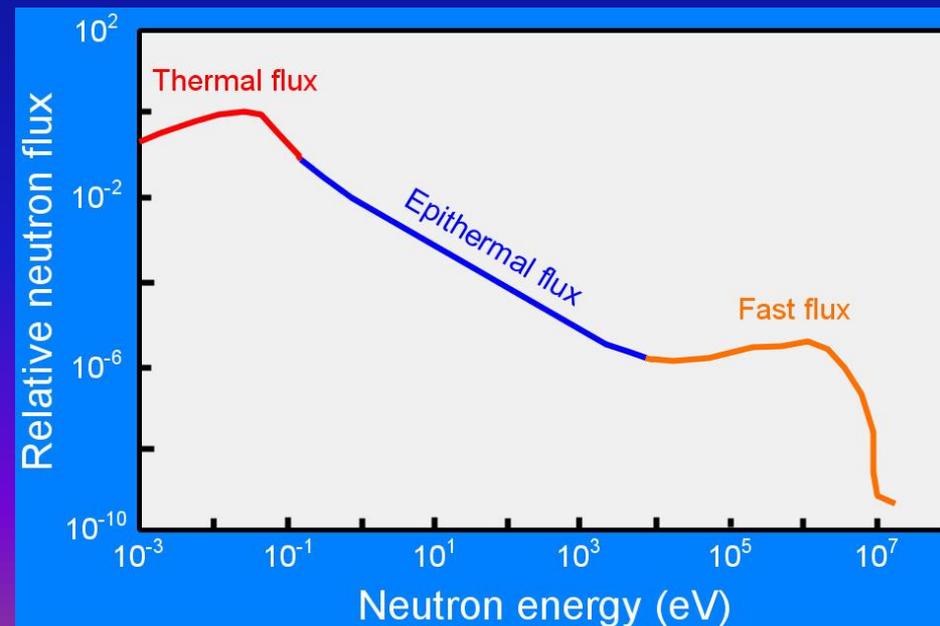
В делениях рождаются быстрые нейтроны, а тепловые нейтроны появляются в результате замедления быстрых нейтронов.

Замедляющийся нейтрон становится тепловым в тот момент, когда в конце процесса замедления он пересекает некоторую граничную энергию, энергию сшивки (E_c).

При этой энергии спектр замедляющихся нейтронов плавно переходит в спектр тепловых Максвелла.

Величина энергии сшивки зависит от средней температуры активной зоны ($6 \div 10$) *кТн*.

С ростом температуры реактора энергия сшивки растёт.



Нейтронный цикл

Тепловой реактор, состоящий из: ^{235}U , ^{238}U , замедлитель, теплоноситель и конструкционные материалы.

Пусть в результате деления ^{235}U тепловыми нейтронами рождается $n_{\bar{0}i}$ быстрых нейтронов деления i -го поколения со средней энергией $E_{\text{cp}} = 2$ МэВ.

Нейтроны начинают замедляться и в начале замедления (2 ÷ 1,1 МэВ) могут вызывать деление ^{238}U , результате которого появляются новые быстрые нейтроны деления.

Общее число нейтронов станет равным $\mu n_{\bar{0}i}$

μ - коэффициент использования быстрых нейтронов, показывает, во сколько увеличивается число нейтронов за счет деления ^{238}U .

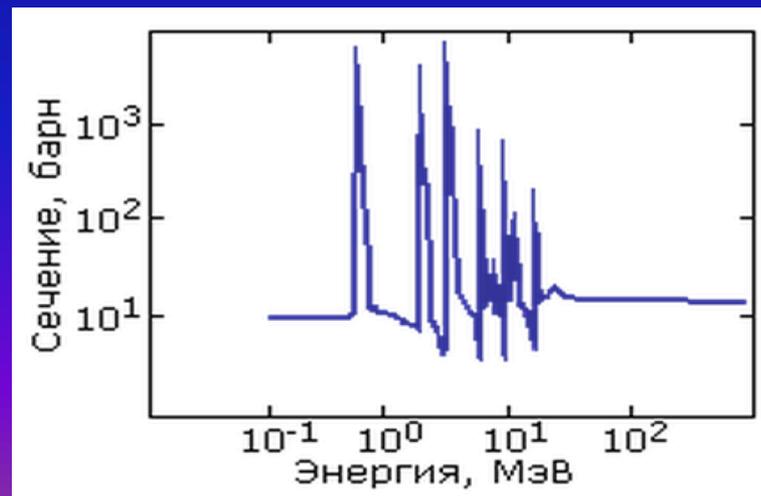
Нейтронный цикл

$\mu_{\bar{0}i}$ быстрых нейтронов продолжают замедление в активной зоне реактора, но часть их претерпит утечку во время замедления.

p_3 - вероятность избежать утечку замедляющихся нейтронов - доля нейтронов, избежавших утечки из активной зоны при замедлении.

К концу процесса замедления в активной зоне реактора должно было бы остаться $n_{\bar{0}i} \cdot \mu \cdot p_3$ нейтронов i -го поколения. Но...

^{238}U является сильным поглотителем замедляющихся нейтронов в области энергий (6 ÷ 600) эВ:
резонансный захват



Нейтронный цикл

φ - вероятность избежать резонансного захвата – доля нейтронов, избежавших резонансный захват при замедлении, от числа нейтронов поколения, замедляющихся в пределах активной зоны реактора.

$n_{\delta i} \cdot \mu \cdot p_3 \cdot \varphi$ нейтронов i -го поколения замедлятся до тепловых энергий.

Часть тепловых нейтронов покинет активную зону – подвергнется утечке.

P_m **вероятность избежать утечки для тепловых нейтронов** – доля тепловых нейтронов, избежавших утечки из активной зоны при диффузии, от числа тепловых нейтронов поколения, начавших процесс диффузии в активной зоне.

Нейтронный цикл

$$n_{\bar{0}i} \cdot \mu \cdot p_z \cdot \varphi \cdot p_m$$

нейтронов i -го поколения достигнут конца диффузии - поглотятся.

Поглощение может быть бесполезным или созидательным . Если нейтрон поглотится ^{235}U , то он сможет вызвать деление и рождение новых нейтронов.

θ – коэффициент использования тепловых нейтронов – доля тепловых нейтронов, поглощаемых делящимися ядрами, от всех тепловых нейтронов поколения, поглощаемых всеми компонентами активной зоны.

Количество тепловых нейтронов i -го поколения, поглощенных ядрами ^{235}U , будет равно

$$n_{\bar{0}i} \cdot \mu \cdot p_z \cdot \varphi \cdot p_m \cdot \theta$$

Нейтронный цикл

η Не все поглощенные топливом нейтроны приводят к делению ядер ^{235}U . Часть из них завершится радиационным захватом.

– среднее число получаемых нейтронов деления, приходящееся на каждый поглощаемый делящимися нуклидами топливом нейтроном

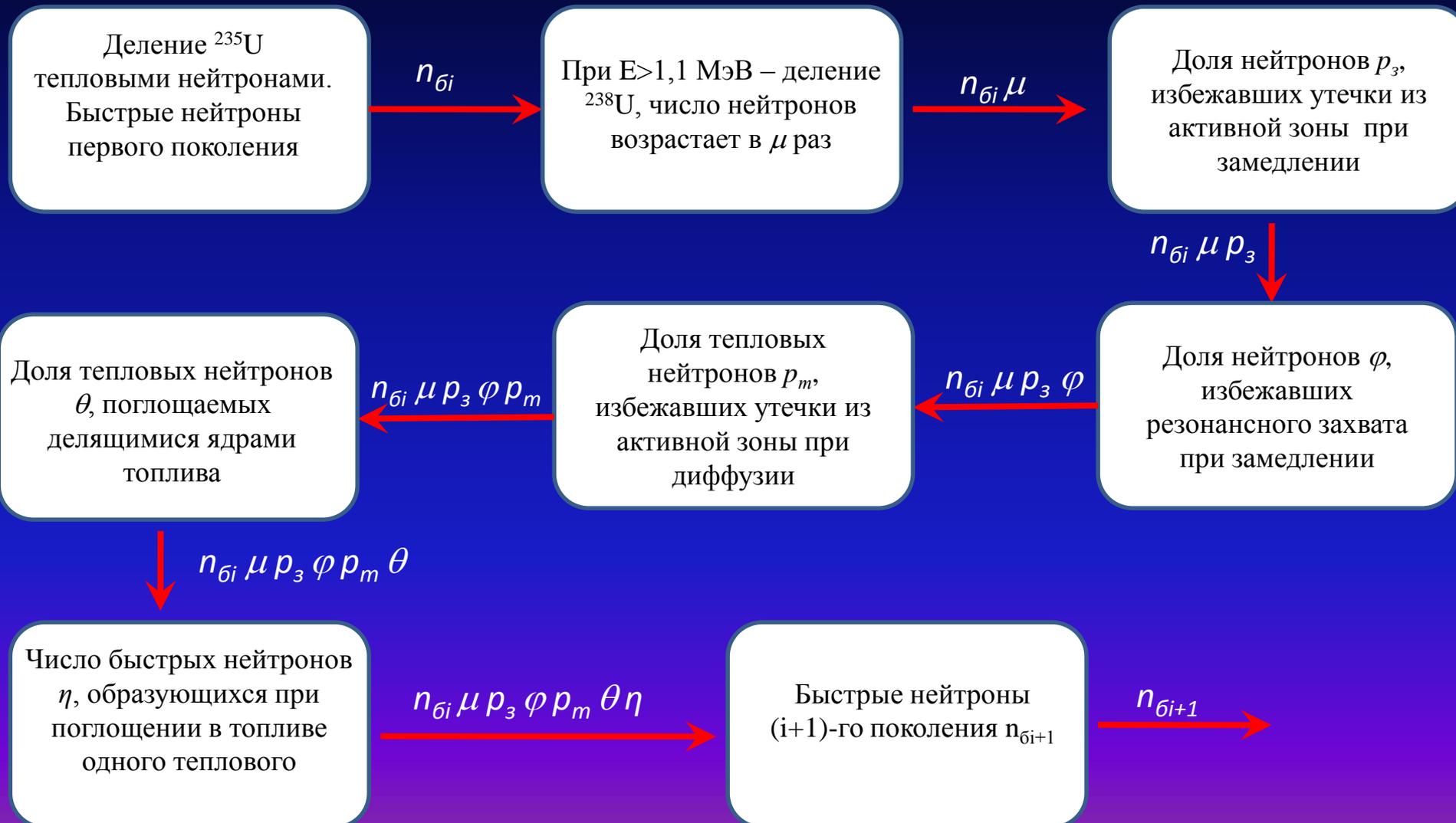
$$n_{\bar{\sigma}i} \cdot \mu \cdot p_z \cdot \varphi \cdot p_m \cdot \theta \cdot \eta = n_{\bar{\sigma}i+1}$$

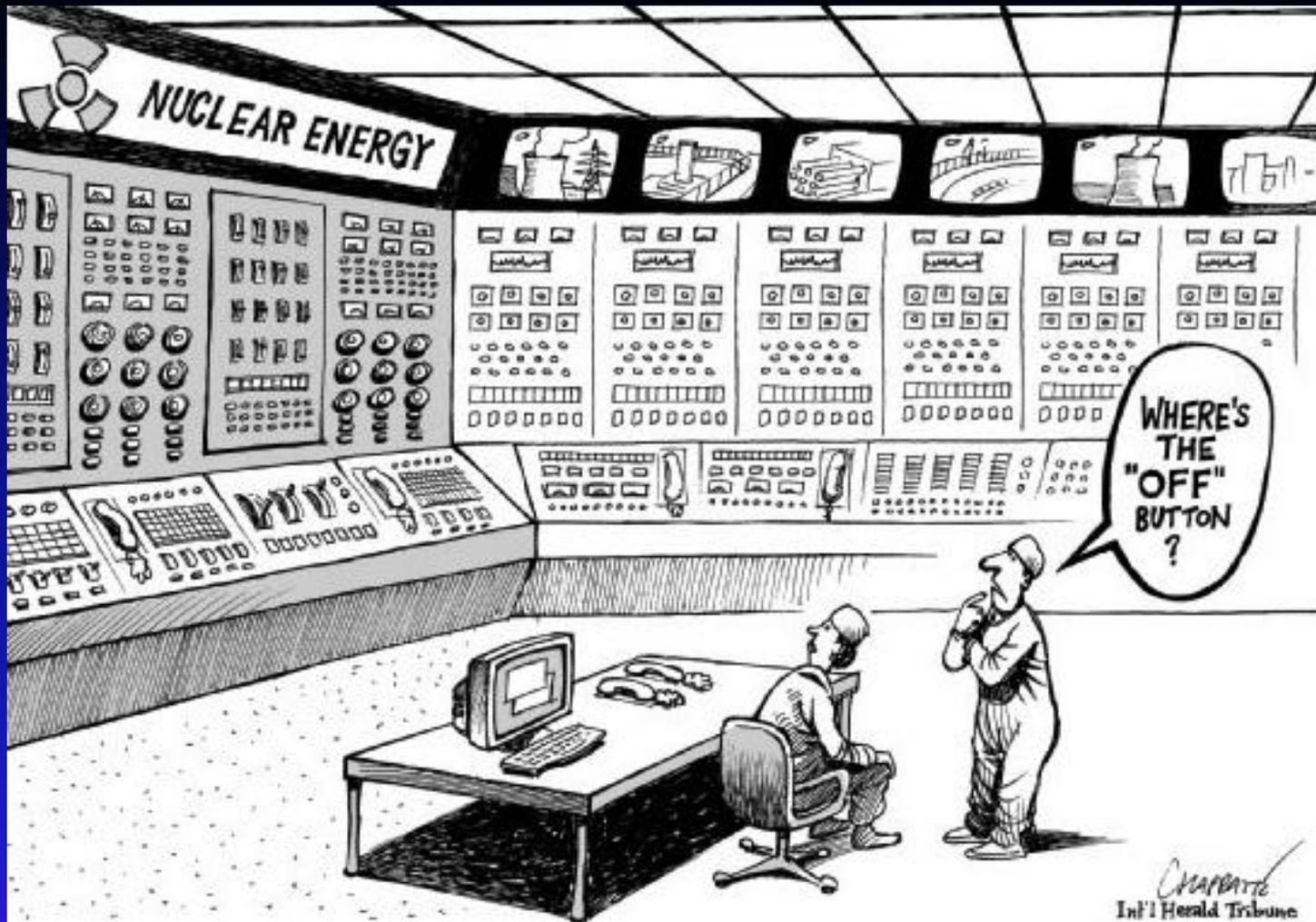
В новом $i+1$ поколении число быстрых нейтронов будет равным:

$$k_{\text{эфф}} = \frac{n_{\bar{\sigma}i+1}}{n_{\bar{\sigma}i}} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta \cdot p_z \cdot p_m$$

$k_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент размножения равен:

Нейтронный цикл и характеристики его физических процессов





Управляя процессами нейтронного цикла возможно
воздействовать на мощность реактора

Формула четырех сомножителей

$$k_{эфф} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta \cdot p_z \cdot p_m$$

Для управления процессами нейтронного цикла необходимо исследовать каждую из его частных характеристик.

p_z, p_m определяются формой и размерами активной зоны.

Размножающие свойства бесконечной среды определяются только совокупностью компонентов среды этой активной зоны безотносительно к её размерам:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta$$

k_{∞} – коэффициент размножения в бесконечной среде.

Эффективный коэффициент размножения

k_{∞} служит характеристикой собственных размножающих свойств среды активной зоны определённого состава, указывает максимально-возможную величину эффективного коэффициента размножения в активной зоне при бесконечном увеличении её размеров.

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot p_3 \cdot p_m$$

В реальном энергетическом реакторе конечных размеров, работающем в критическом режиме:

$$p_3 \cdot p_m < 1$$

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta > 1$$

Активная зона реального критического реактора должна быть скомпонована из материалов, совокупность которых обладает собственными надкритическими размножающими свойствами.

С учётом утечки нейтронов эффективный коэффициент размножения должен быть равен единице.

Продолжение следует...

