

Лекция 5

Нестационарные режимы и управление реактором

- В процессе работы реактор в основном находится в нестационарном состоянии. Это вызвано либо переходными процессами, связанными с изменением мощности реактора, либо очень малыми колебаниями реактивности под влиянием различных внутренних или внешних факторов.
- Изменение во времени плотности Φ нейтронного потока зависит от ее исходного значения и количества вторичных нейтронов, образующихся за 1 с:

$$\Phi(t) = \Phi_0 \exp\left[\left(\rho/\tau_n\right) t\right] - \text{уравнение кинетики реактора,}$$

где τ_n — среднее время жизни нейтронов одного поколения с учетом $k_{\text{эф}} - 1 \approx \rho$

- *Время жизни одного поколения мгновенных нейтронов $\tau_{\text{мгн}}$ складывается из трех величин: времени вылета быстрых нейтронов при делении ($\tau_{\text{дел}} \sim 10^{-14}$ с); времени замедления быстрых нейтронов до тепловых ($\tau_{\text{зам}} \sim 10^{-4}$ с); времени диффузии тепловых нейтронов до их захвата делющимся ядром ($\tau_{\text{диф}} \sim 10^{-3}$ с).*
- Таким образом, значение $\tau_{\text{мгн}}$ в цепной реакции деления на тепловых нейтронах определяется процессом диффузии: $\tau_{\text{мгн}} \sim \tau_{\text{диф}} \sim 10^{-3}$ с. При делении на быстрых нейтронах это время снижается до 10^{-7} с.

Управление ядерным реактором становится возможным благодаря наличию **запаздывающих нейтронов**

- Из уравнения **кинетики реактора** следует, что при значении $\tau_n = \tau_{\text{МГН}} = 10^{-3}$ с, если даже принять $\rho = 5 \cdot 10^{-3}$, плотность потока нейтронов возрастает за 1 с в 150 раз ($\Phi/\Phi_0 = e^{5 \sim 150}$). Поэтому цепная реакция деления на мгновенных нейтронах является **неуправляемой**.
- Управление ядерным реактором становится возможным благодаря наличию **запаздывающих нейтронов**. Хотя количество таких нейтронов мало, время их выхода достаточно велико. Поэтому среднее время жизни всех нейтронов τ_n возрастает:
- $$\tau_n = \tau_{\text{зап}} \beta + \tau_{\text{МГН}} (1 - \beta). \quad (4.9)$$
- Для нуклида ^{235}U имеем $\tau_n \approx 0,1$ с при значениях $\beta = 0,0065$ и $\tau_{\text{зап}} = 13$ с. При $\tau_n \approx 0,1$ с возрастание плотности нейтронов за 1 с составляет всего 5% ($\Phi/\Phi_0 = e^{0,05} \approx 1,05$) и **цепная реакция деления становится надежно управляемой**.

- Эффективный коэффициент размножения реактора можно представить в виде суммы:

- $$k_{\text{эф}} = k_{\text{мгн}} + k_{\text{зап}}. \quad (4.10)$$

- Первое слагаемое представляет собой коэффициент размножения на мгновенных нейтронах

- $$k_{\text{мгн}} = k_{\text{эф}} (1 - \beta). \quad (4.11)$$

- Второе слагаемое — это коэффициент размножения на запаздывающих нейтронах

- $$k_{\text{зап}} = k_{\text{эф}} \beta. \quad (4.12)$$

- Если $k_{\text{мгн}} < 1$, то протекание цепной реакции зависит как от мгновенных, так и от запаздывающих нейтронов. В этом случае при отсутствии делений на запаздывающих нейтронах происходит затухание цепной реакции. При $k_{\text{мгн}} > 1$ цепная реакция деления развивается на одних мгновенных нейтронах и становится неуправляемой.

- Реактор, у которого $k_{\text{мгн}} = 1$, называют мгновенно-критическим. Для такого реактора из соотношения (4.11) находим, что $k_{\text{эф}} \approx 1 + \beta$ или $\rho \approx \beta$.

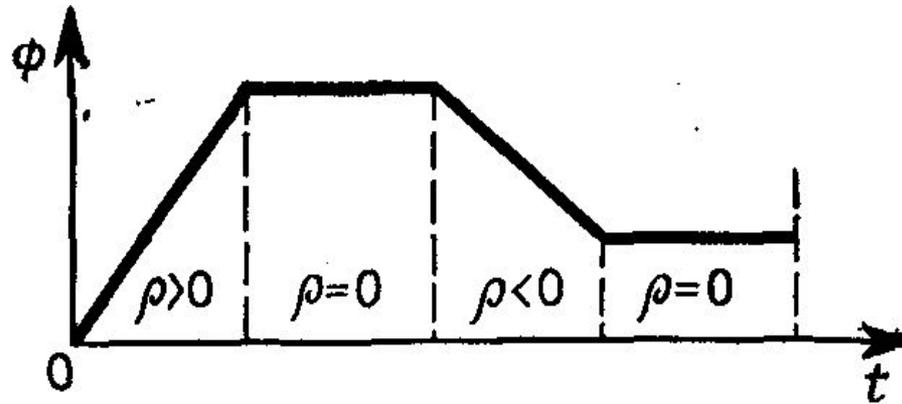
Три основные функции СУЗ:

- 1) компенсация избыточной реактивности;
- 2) изменение мощности реактора, включая его пуск и останов, а также регулирование (поддержание) мощности при малых, но достаточно быстрых отклонениях от критичности, вызванных случайными колебаниями параметров;
- 3) аварийная защита реактора (быстрое и надежное гашение цепной реакции деления).

Органы СУЗ

- Основной частью СУЗ являются *рабочие органы*, представляющие собой поглощающие стержни, которые вводят в активную зону.
- Чем глубже в активной зоне находится поглощающий стержень, тем больше захват нейтронов и ниже коэффициент размножения. В качестве поглощающих материалов используют бор, кадмий и др. Наибольшее распространение получил карбид бора B_4C , имеющий необходимую термическую и радиационную стойкость.
- В соответствии с функциями СУЗ поглощающие стержни разделяют на три группы: *стержни автоматического регулирования (АР)*, *компенсирующие стержни (КС)* и *стержни аварийной защиты (АЗ)*.
- Стержни АР служат для изменения мощности реактора и поддержания ее на заданном стационарном уровне. Перемещение стержней АР изменяет реактивность активной зоны и тем самым переводит реактор в различные состояния: надкритическое (рост мощности), критическое (стационарный уровень мощности) и подкритическое (снижение мощности).

Рис.3.4. Изменение плотности нейтронного потока при различных значениях реактивности.



- Компенсирующие стержни служат для компенсации запаса реактивности во время работы реактора и создания необходимой подкритичности в остановленном реакторе. В начальный период работы реактора они находятся в крайнем нижнем положении, т.е. полностью введены в активную зону. По мере работы реактора запас реактивности уменьшается и КС постепенно выводятся из активной зоны. Вывод их в крайнее верхнее положение свидетельствует о выработке всего запаса реактивности, о завершении кампании реактора.
- Для продолжения работы реактора требуется замена отработавшего ядерного топлива на свежее. Введение в активную зону большого числа КС с целью увеличения кампании реактора сопряжено с физическими и техническими трудностями. Поэтому при наличии КС в различные компоненты активной зоны дополнительно вводят *выгорающий поглотитель*. Во время работы реактора количество ядер выгорающего поглотителя непрерывно уменьшается вследствие захвата нейтронов и превращения их в другие нуклиды с низким сечением поглощения.

Система борного регулирования

- В реакторах с водяным охлаждением без кипения *система борного регулирования*, обеспечивает компенсацию медленных изменений реактивности в течение всей кампании. В водный теплоноситель,, добавляют борную кислоту. Ее концентрация зависит от времени работы реактора и определяется темпом и глубиной выгорания ядерного топлива. Концентрация борной кислоты максимальна (до 1%) в начале кампании, затем ее постепенно снижают до нуля (в конце кампании).
- Достоинством борного регулирования является то, что оно не искажает поле нейтронного потока в активной зоне и приводит к снижению числа компенсирующих стержней в реакторе.
- Для прекращения цепной реакции деления при возникновении аварийных ситуаций, требующих немедленного останова реактора, в активную зону с максимальной скоростью вводят стержни аварийной защиты. Стержни АЗ находятся в работающем реакторе вне активной зоны, а при необходимости под действием собственного веса или специальных устройств быстро падают в , снижая ее реактивность и прекращая цепную реакцию деления

Изменение нуклидного состава при работе реактора.

Выгорание топлива.

- **Нуклидный состав ядерного топлива непрерывно изменяется во время работы реактора. В соответствии с этим непрерывно изменяется и полный запас реактивности**
- **В процессе деления ядер топлива происходит непрерывная *убыль* делящегося вещества. Этот процесс называется *выгоранием*. Наряду с выгоранием ядер урана-235, за счёт захвата нейтронов ядрами урана-238 образуется смесь изотопов плутония.**
- **Процесс образования новых делящихся нуклидов называется *воспроизведением ядерного топлива*.**

- **Поглощение нейтронов стабильными или долгоживущими радиоактивными нуклидами принято называть шлакованием, а поглощение короткоживущими радиоактивными нуклидами - в основном ядрами Хе-135 - отравлением.**
- **Вследствие накопления в активной зоне шлаков и отравляющих продуктов уменьшается доля нейтронов, поглощаемых в топливе, а, следовательно, и коэффициент размножения. Если бы реактор имел точно критическую загрузку, то использование его для получения энергии было бы исключено.**
- **Поэтому загрузка топлива должна превышать критическую массу, и это превышение определяет продолжительность кампании реактора.**

- **Зависимость Кэф от нуклидного состава топлива выражается через коэффициенты $\eta, \mu, \phi, \theta, L$ и т.**
- **В реакторе на тепловых нейтронах обогащение обычно невелико, основным материалом блока является уран-238, и, относительное выгорание настолько мало, что практически не сказывается на коэффициентах μ и ϕ .**
- **Возраст нейтронов зависит от рассеивающих свойств среды Σ_s . Изменение состава топлива мало сказывается на величинах λ и β , и возраст тепловых нейтронов t в процессе кампании практически не изменяется.**
- **Изменение нуклидного состава топлива сказывается в первую очередь на коэффициентах η, θ и L .**

• **МОЩНОСТЬ РЕАКТОРА**

- **Мощность реактора прямо пропорциональна произведению потока нейтронов на концентрацию делящихся нуклидов.**
- Так как количество делящихся нуклидов со временем непрерывно изменяется, то для поддержания постоянства мощности необходимо изменять плотность потока нейтронов.
- **При одной и той же мощности плотность потока нейтронов в конце кампании будет больше, чем в начале.**
- Определим закон изменения плотности потока нейтронов во времени, при котором обеспечивается постоянная мощность реактора.
- **При постоянной мощности для любого произвольного момента времени t скорость деления такая же, как и в начальный момент времени $t=0$**
$$\Phi(t) N^5(t) \sigma_a^5 = \Phi_0 N_0^5 \sigma_a^5$$

Для поддержания мощности на постоянном уровне по мере увеличения среднего по активной зоне выгорания топлива, необходимо, чтобы плотность потока нейтронов увеличивалась по мере выгорания.

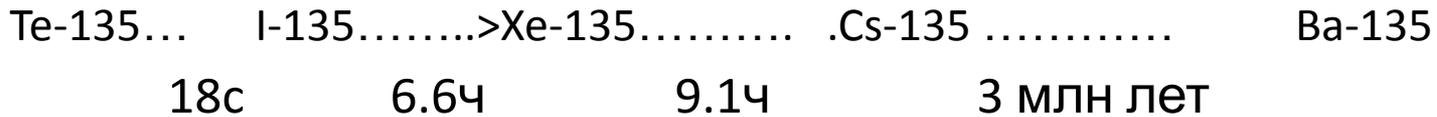
Практически число ядер делящегося нуклида никогда не может уменьшиться до нуля, так как значительно раньше до нуля упадет запас реактивности.

- **Обычно средняя глубина выгорания составляет 10-30% всего загружаемого делящегося вещества.**
- При работе реактора в наибольшем количестве образуется Pu-239.
- **При малом выгорании топлива образование Pu-239 происходит пропорционально энерговыработке,** так как выгорание плутония вследствие его малой концентрации в этот период незначительно, и им можно пренебречь.
- **При более глубоком выгорании рост концентрации Pu-239 замедляется, так как он начинает выгорать более интенсивно.**

Зашлаковывание реактора.

- **Короткоживущие нуклиды обуславливают отравление, а долгоживущие - шлакование реактора. Для удобства расчётов все шлаки принято разделять на три группы в зависимости от сечения поглощения.**
- **К первой группе** относят сильно поглощающие шлаки, сечение захвата которых значительно превосходит сечение поглощения U-235
 - **Ко второй группе** относятся шлаки, для которых сечение поглощения такого же порядка, как и для U-235.
 - **К третьей группе** относятся все остальные шлаки со слабым поглощением

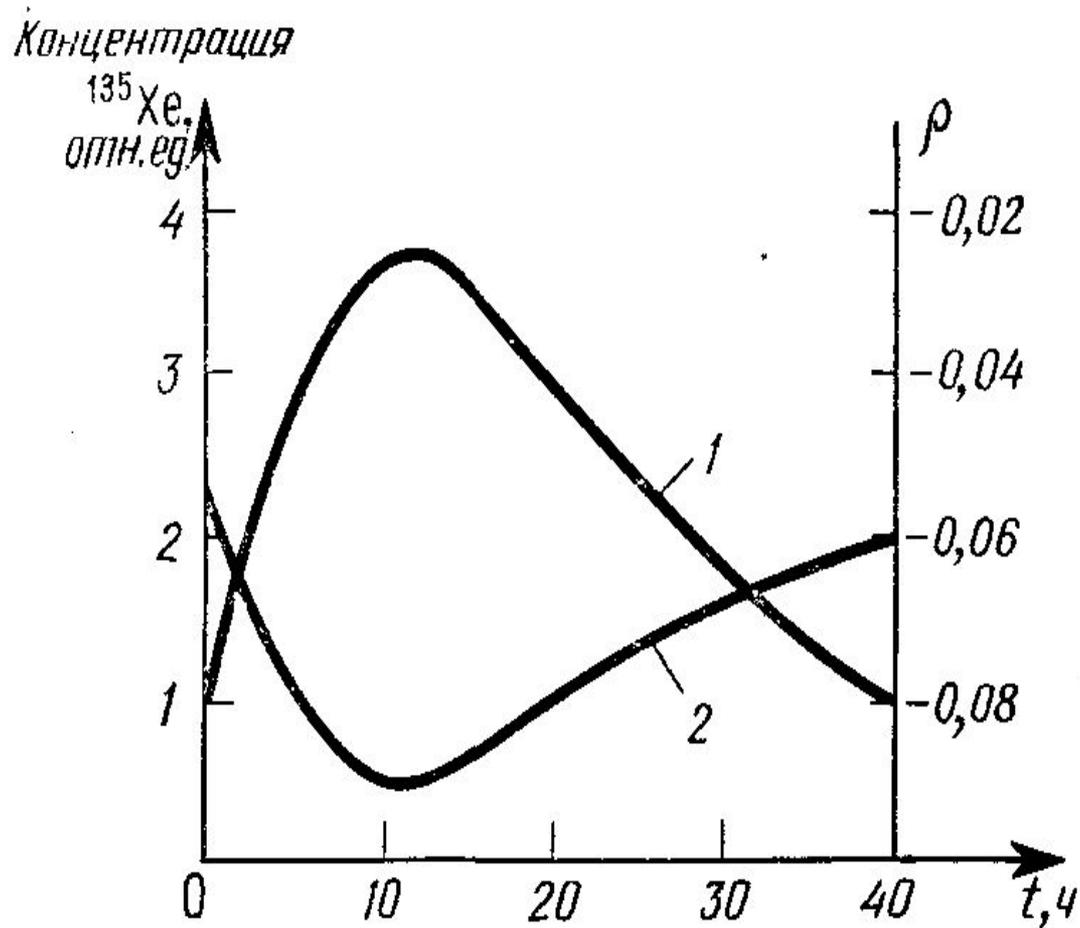
- Среди продуктов деления, влияющих на реактивность реактора, наиболее важен Xe-135, имеющий резонанс при энергии 0,084 эВ и сечение 3150000 барн. **Влияние ксенона на баланс нейтронов называется отравлением. Xe-135 принадлежит следующей цепочке бета-распадов** продуктов деления (числа под стрелками - периоды полураспада):



- Т.к. период полураспада Te-135 мал, при расчётах им обычно пренебрегают и **считают, что I-135 образуется непосредственно.**

- **Отравление реактора определяется двумя нуклидами: ксеноном ($\sigma_a = 3,5 \cdot 10^6$ б) и самарием ($\sigma_a = 5,3 \cdot 10^4$ б). Появление радиоактивного ^{135}Xe связано в основном с радиоактивным распадом ($T_{1/2} = 6,7$ ч). При стационарном режиме реактора устанавливается равновесная концентрация ядер ^{135}Xe , которая зависит от скорости образования ядер ^{135}Xe из ^{135}I и скорости их убывания за счет захвата нейтронов (превращения в ^{136}Xe), а также от собственного распада ^{135}Xe ($T_{1/2} = 9,2$ ч).**
- **Изменение мощности ядерного реактора приводит к нарушению динамического равновесия между образованием и убылью ядер ^{135}Xe . В максимальной степени этот эффект проявляется при останове реактора. После останова реактора прекращаются образование ядер ^{135}I и убыль ядер ^{135}Xe за счет поглощения нейтронов в реакции $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$. Накопившиеся к моменту останова ядра ^{135}I и ^{135}Xe продолжают распадаться. Но распад ^{135}I представляет собой рождение ^{135}Xe , причем этот процесс происходит быстрее, чем распад ^{135}Xe . Поэтому концентрация ^{135}Xe временно увеличивается, пока $\lambda_{\text{Xe}} N_{\text{Xe}} < \lambda_{\text{I}} N_{\text{I}}$ (рис. 3.5).**

Рис. 3.5. Зависимость концентрации ^{135}Xe (1) и реактивности (2) от времени после останова реактора



- **Время после останова реактора, в течение которого глубина "иодной ямы" не превышает запаса реактивности в момент остановки, называется временем допустимой стоянки ($t_{д.ст.}$).**
- **До момента $t_{д.ст.}$ реактор можно повторно запустить при имеющемся запасе реактивности.**
- **Время после останова, в течение которого глубина "иодной ямы" больше запаса реактивности и реактор нельзя вывести на мощность называется временем вынужденной стоянки ($t_{в.ст.}$).**
- **$t_{д.ст}$ и $t_{в.ст.}$ зависят от запаса реактивности перед остановкой $\rho_{зап}$, от мощности перед остановкой и от времени работы на этом уровне мощности.**

Методы изменения реактивности

- Управление мощностью реактора осуществляется путем измерения соотношения между скоростями **ГЕНЕРАЦИИ, ПОГЛОЩЕНИЯ И УТЕЧКИ** нейтронов.
- В стационарном состоянии, когда коэффициент размножения равен единице, скорость генерации нейтронов равна сумме скоростей поглощения и утечки.
- Для изменения этого равновесия, т.е. для изменения мощности реактора или, наоборот, восстановления равновесия, если под влиянием каких-либо внешних причин оно нарушается, необходимо воздействие на один из трех указанных факторов.
- При этом увеличение скорости генерации приводит к возрастанию реактивности, а усиление поглощения или утечки нейтронов - к уменьшению реактивности.

Избыточная реактивность

-
- Превышение коэффициента размножения свежего топлива над критическим значением

носит название избыточной реактивности на выгорание топлива

$$\Delta K = K_{\infty} - K_{CRIT}$$

Запас реактивности

- Рассмотренные физические процессы в реакторе связаны с дополнительной потерей нейтронов в активной зоне, поэтому для компенсации происходящего снижения реактивности необходимо увеличить начальную загрузку ядерного топлива по сравнению с критическим значением, которое характеризуется *запасом реактивности*:
- $\rho_{\text{зап}} = [(k_{\text{эф}})_{\text{зап}} - 1] / (k_{\text{эф}})_{\text{зап}}$,
- где $(k_{\text{эф}})_{\text{зап}}$ — максимально возможное значение $k_{\text{эф}}$ при полностью извлеченных из активной зоны поглотителях нейтронов.
- Запас реактивности необходим для компенсации выгорания топлива $\rho_{\text{выг}}$, отравления реактора $\rho_{\text{отр}}$, шлакования $\rho_{\text{шл}}$, температурных эффектов $\rho_{\text{т}}$, а также для компенсации йодной ямы при небольшом снижении мощности или пуске реактора после запланированной стоянки $\rho_{\text{оп}}$ (оперативный запас реактивности):
- $\rho_{\text{зап}} \geq \rho_{\text{выг}} + \rho_{\text{отр}} + \rho_{\text{шл}} + \rho_{\text{т}} + \rho_{\text{оп}} - \rho_{\text{вос}}$