



СХК
РОСАТОМ

Физические основы обеспечения ядерной безопасности реакторной установки

Чередов Вячеслав Михайлович

Инженер-технолог (по ЯБ), ведущий ОЯБ АО «СХК»

Эффективный коэффициент размножения

Состояние системы (среды) характеризуется эффективным коэффициентом размножения ($K_{эф}$), который определяется как отношение числа нейтронов данного поколения к предыдущему (N'/N).

$$K_{эф} = \frac{N'}{N} = \frac{\text{Рождение}}{\text{Поглощение} + \text{Утечка}}$$

$K_{эф} = 1$, то говорят, что система находится в критическом состоянии;

$K_{эф} > 1$, система надкритическая, развивается неуправляемая СЦР;

$K_{эф} < 1$, система подкритическая, СЦР не возможна.

Критическое состояние среды – это результат баланса между рождёнными и исчезнувшими нейтронами.

Реакторная установка



Реакторная установка – комплекс систем и элементов АС, предназначенный для преобразования ядерной энергии в тепловую, включающий реактор и непосредственно связанные с ним системы, необходимые для его нормальной эксплуатации, аварийного охлаждения, аварийной защиты и поддержания в безопасном состоянии при условии выполнения требуемых вспомогательных и обеспечивающих функций другими системами АС.

Активная зона – часть реактора, в которой размещены ядерное топливо, замедлитель, поглотитель, теплоноситель, средства воздействия на реактивность и элементы конструкций, предназначенные для осуществления управляемой цепной ядерной реакции деления и передачи энергии теплоносителю.

Классификация ядерных реакторов

По назначению выделяют:

- **энергетические реакторы**, предназначенные для получения электрической и тепловой энергии, используемой в энергетике;
- **промышленные реакторы**, используемые для наработки стабильных и радиоактивных изотопов.
- **транспортные реакторы**, предназначенные для снабжения энергией двигателей транспортных средств.
- **экспериментальные реакторы**, предназначенные для изучения различных аспектов работы ядерных реакторов.
- **исследовательские реакторы** служат источником нейтронов, бэта и гамма-излучений, которые используются в научных целях.
- **многоцелевые.**

По энергии нейтронов, при которой происходит основная часть реакций деления:

- реакторы на **быстрых** нейтронах $E_n > 0,1$ МэВ;
- реакторы на **тепловых** нейтронах $E_n < 1$ эВ.

Классификация ядерных реакторов

По виду топливного цикла реакторы делятся на:

- урановые;
- плутониевые
- ториевые.

По коэффициенту воспроизводства на:

- реакторы-конверторы (с коэффициентом воспроизводства < 1);
- реакторы-размножители (с коэффициентом воспроизводства > 1).

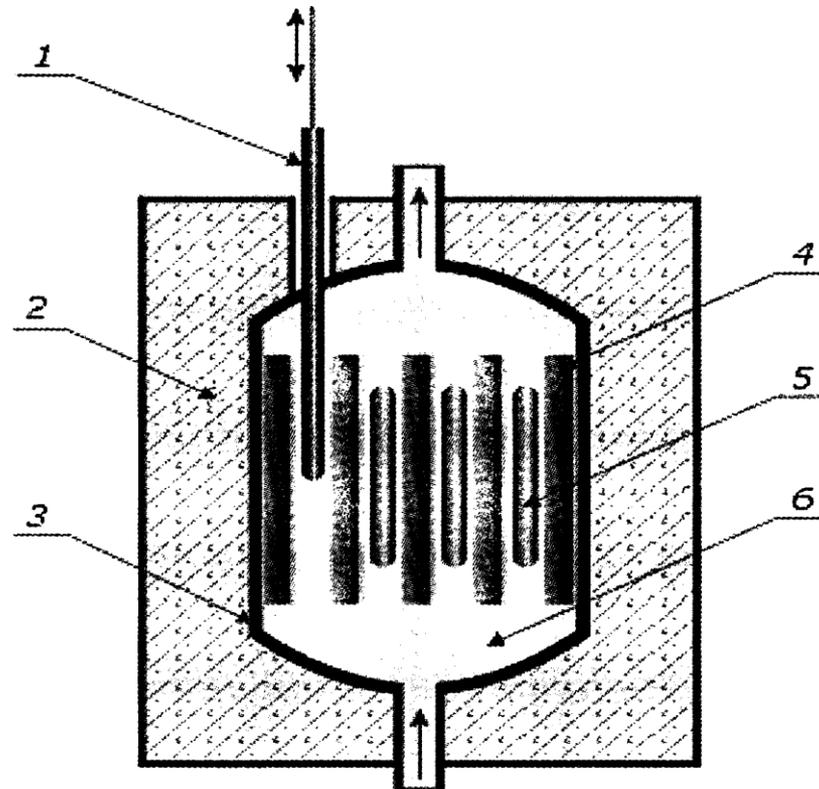
По виду активной зоны:

- корпусные;
- канальные;
- канально-корпусные реакторы;

По виду теплоносителя и замедлителя:

- водо-водяные, тепловые реакторы с тяжеловодным или графитовым замедлителем,
- быстрые реакторы с натриевым, гелиевым, жидко-металлическим теплоносителем,
- реакторы с жидко-солевым теплоносителем;

Состав ядерного реактора



Примерный состав ядерного реактора:

**1 - управляющий стержень; 2 - радиационная защита; 3 - теплоизоляция;
4 - замедлитель; 5 - ядерное топливо; 6 - теплоноситель**

Активная зона

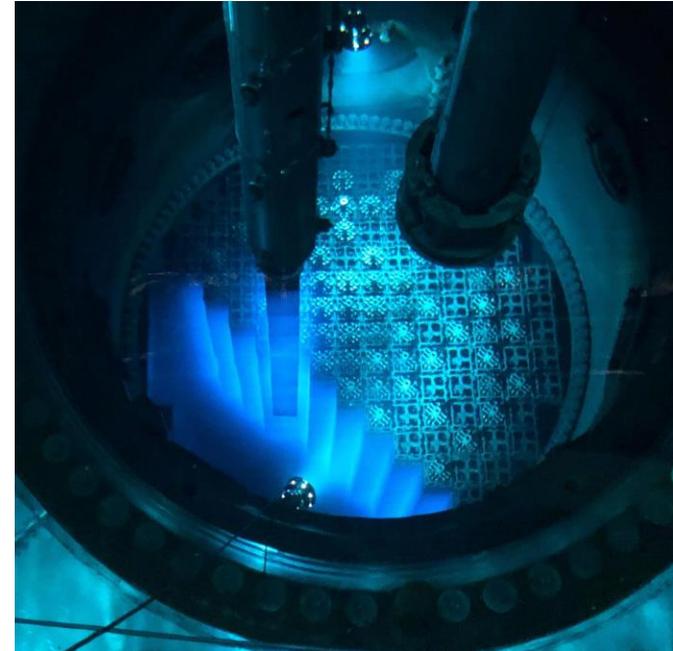
В состав активной зоны входят:

- ядерное топливо;
- замедлитель (для реакторов на тепловых нейтронах);
- теплоноситель;
- устройства систем управления и защиты реактора.

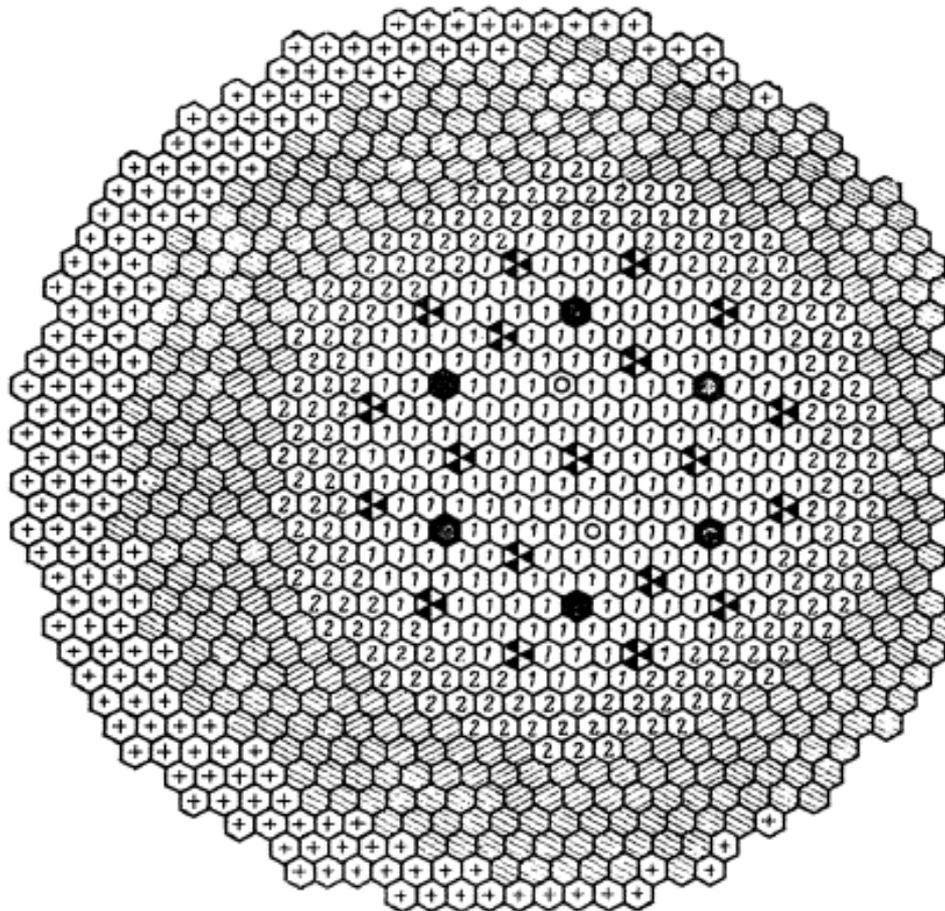
Активная зона практически всегда окружена отражателем, который возвращает часть вылетающих нейтронов обратно в активную зону благодаря рассеянию на ядрах с изменением направления движения нейтронов на обратное.

Как правило, отражатель состоит из того же вещества, что и замедлитель

В быстрых реакторах вокруг активной зоны располагается зона воспроизводства, в которой происходит воспроизводство и накопление вторичного топлива. Зона воспроизводства выполняет также функцию отражения нейтронов в активную зону. Отражатель, расположенный за зоной воспроизводства, возвращает часть нейтронов утечки обратно в зону воспроизводства, что увеличивает коэффициент воспроизводства топлива в реакторе.



Активная зона

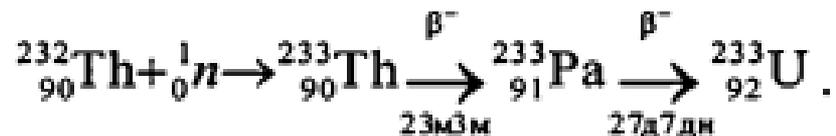
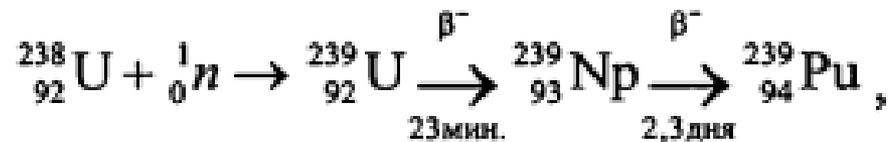


- ТВС активной зоны
- Внешняя зона воспроизводства
- ⊗ Компенсирующий стержень
- ⊗ Внутренняя зона воспроизводства
- ⊗ Стержень РС
- Стержень АЗ
- ⊕ Хранилище отработанных ТВС

Ядерное топливо

Для устойчивой работы ядерного реактора должны выполняться следующие условия протекания ядерных реакций:

1. На каждый поглощенный нейтрон должно выделяться больше одного нейтрона.
2. Реакция должна быть экзотермической, т. е. происходить с выделением теплоты.
3. Энергия образующего нейтрона должна превышать пороговую энергию нейтрона, которая необходима, чтобы вызвать реакцию деления.



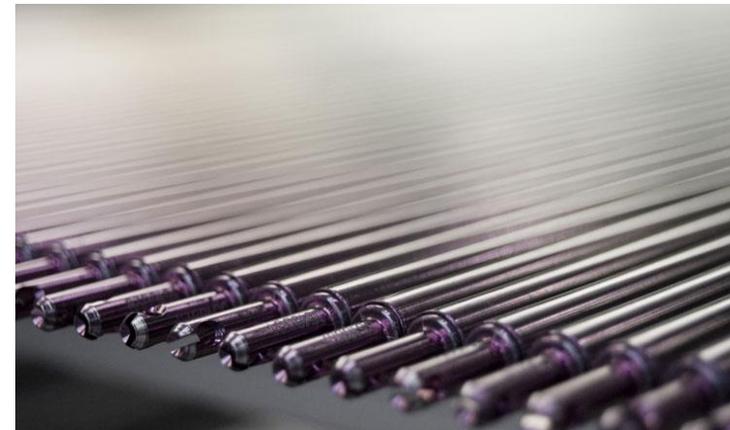
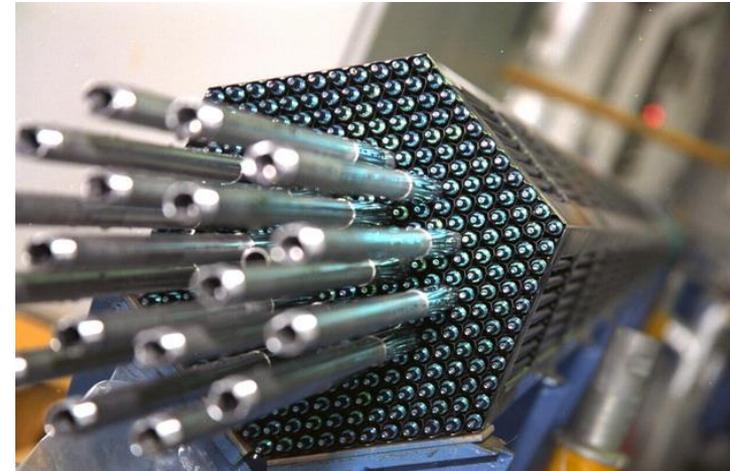
Ядерное топливо

Составы различных типов ядерного топлива для **тепловых** ЯР:

- Топливо из UO_2 (3,5 – 4,5 % ^{235}U + ^{238}U) – один цикл, перерабатываемое;
- РЕМИКС топливо (1% ^{239}Pu + 3% $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$) – многократное рециклирование, перерабатываемое.

Составы различных типов ядерного топлива для **быстрых** ЯР:

- МОКС топливо (5 - 7 % ^{239}Pu + ^{238}U) – один цикл, неперерабатываемое;
- СНУП топливо (15% ^{239}Pu + 85% ^{238}U) – многократное рециклирование, перерабатываемое.



Ядерное топливо

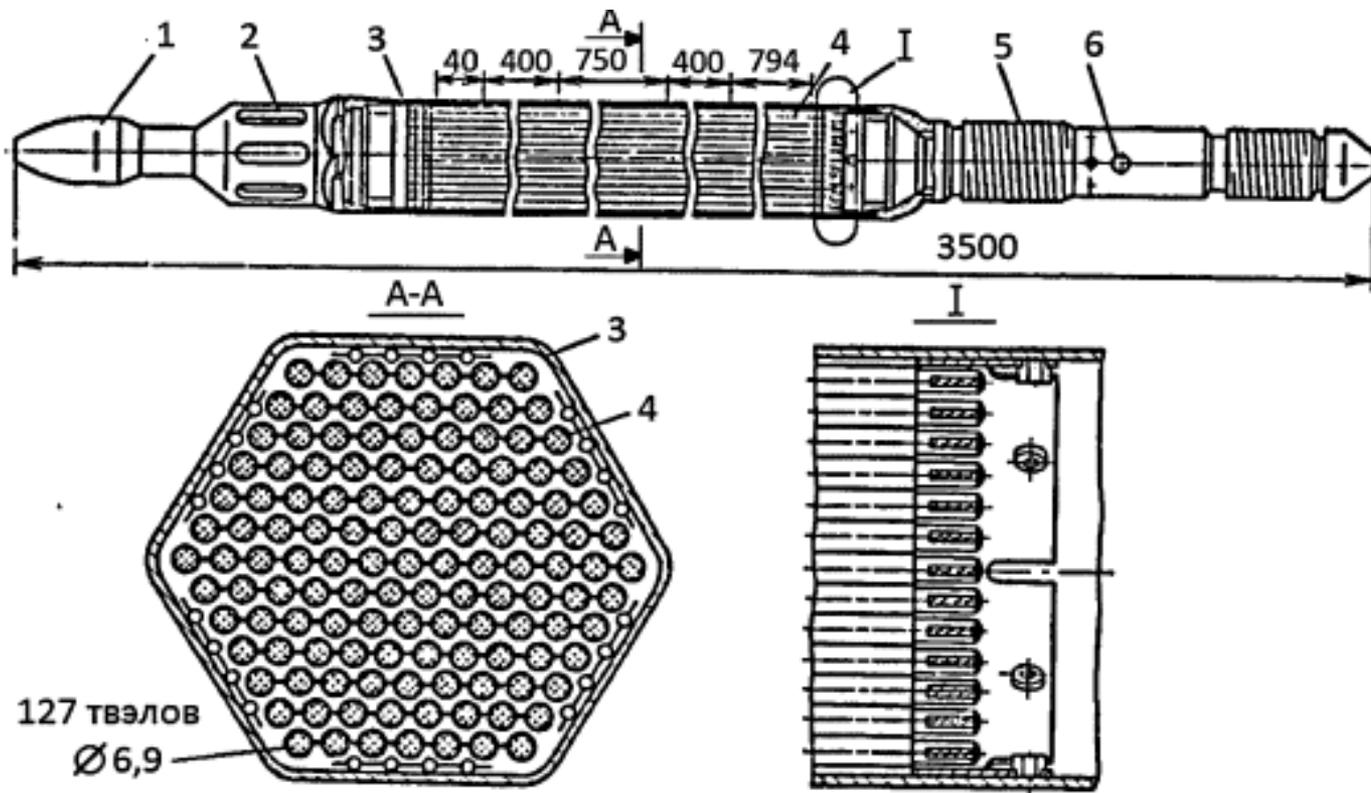


Рис. 2.4. ТВС реактора БН-600:

1 – верхняя головка под захват; 2 – окна для выхода теплоносителя; 3 – шестигранный корпус ТВС; 4 – ТВЭЛы активной зоны; 5 – хвостовик; 6 – отверстие для подвода теплоносителя

Особенности физики реакторов на быстрых нейтронах



СХК
РОСАТОМ

Основное число делений в реакторах на быстрых нейтронах происходит при энергии поглощаемых нейтронов порядка 0,1-0,5 МэВ. В этой области среднее сечение поглощения основных делящихся нуклидов (уран-235 и плутоний-239) составляет 1,5-2,5 барн или в 200-300 раз меньше, чем в тепловой области. Следовательно, критическая масса должна быть существенно (в 100 раз) больше критической массы реактора на тепловых нейтронах при том же объеме активной зоны.

Небольшое сечение деления основного делящегося нуклида обуславливает высокий поток нейтронов в быстром реакторе. В энергетических реакторах на тепловых нейтронах плотность потока составляет 10^{13} - 10^{14} нейтр./($\text{см}^2 \text{ с}$), то в энергетических быстрых реакторах она достигает 10^{15} - 10^{16} нейтр./($\text{см}^2 \text{ с}$).

Особенности физики реакторов на быстрых нейтронах



СХК
РОСАТОМ

Из-за отсутствия аномально высоких сечений захвата нейтронов в области быстрых нейтронов в реакторе отсутствует отравление, связанное с накоплением в активной зоне сильно поглощающих ядер и значительным падением реактивности. Таким образом полностью исключено нестационарное отравление типа «йодной ямы», характерное для «тепловых» реакторов. Отсутствие отравления значительно облегчает процесс управления реактором, в частности обеспечивает его устойчивость относительно возмущений нейтронного потока.

Отношение сечения радиационного захвата урана-238 к сечению деления урана-235 для «быстрого» реактора больше, чем для теплового. Это увеличивает концентрацию делящегося материала; обогащение топлива (минимальное) в «быстрых» реакторах с ураном-235 составляет 15 %, а в реакторе с плутонием-239 минимальная доля этого изотопа в смеси с ^{238}U - 10 %.

Большие размеры активной зоны при больших длинах пробега быстрых нейтронов приводят к большим утечкам нейтронов из активной зоны в отражатель. Для полезного их использования отражатель конструируют из воспроизводящего нуклида, который называется зоной воспроизводства.

Кинетика ЯР

Состояние ЯР характеризуется эффективным коэффициентом размножения нейтронов в активной зоне, но вместо $K_{эф}$ для описания поведения реактора часто используется другая величина – реактивность.

$$\rho = \frac{k_{эф} - 1}{k_{эф}}$$

- если реактору «сообщается нулевая реактивность», то переходного процесса, приводящего к изменению плотности нейтронов в реакторе, не будет.
- при сообщении критическому реактору положительных реактивностей, то переходный процесс возрастающий, причём тем более резко, чем больше величина сообщённой реактору реактивности;
- при сообщении реактору отрицательных реактивностей переходный процесс - убывающий;

Чем больше абсолютная величина сообщаемой первоначально критическому реактору реактивности, тем интенсивнее протекают в реакторе переходные процессы изменения плотности нейтронов.

Кинетика ЯР

Интенсивность протекания переходных процессов в реакторе зависит также и от величины среднего времени жизни поколения нейтронов λ . Чтобы получить представление о важности этой зависимости для безопасного управления реактором, определим, во сколько раз увеличится плотность нейтронов в реакторе за одну секунду после сообщения реактору положительной реактивности $\rho = 0,001$ (или 0,1 %) при разных значениях среднего времени жизни поколения нейтронов в реакторе: $\lambda = 10^{-4}$ с, $\lambda = 10^{-3}$ с, $\lambda = 10^{-2}$ с и $\lambda = 10^{-1}$ с.

При $\lambda = 10^{-4}$ с секундное увеличение плотности тепловых нейтронов в реакторе получается равным ~ 22000 .

При $\lambda = 10^{-3}$ с секундное увеличение мощности реактора получается равным $\sim 2,71828$, т. е. почти троекратным.

При $\lambda = 10^{-2}$ с за одну секунду мощность увеличивается в $e^{0,1}$, что составляет приблизительно 1,10.

При $\lambda = 0,1$ с, секундное увеличение мощности реактора составляет $e^{0,01} \sim 1,01$, т. е. всего на 1 % от начального значения.

Мгновенные и запаздывающие нейтроны и их характеристики

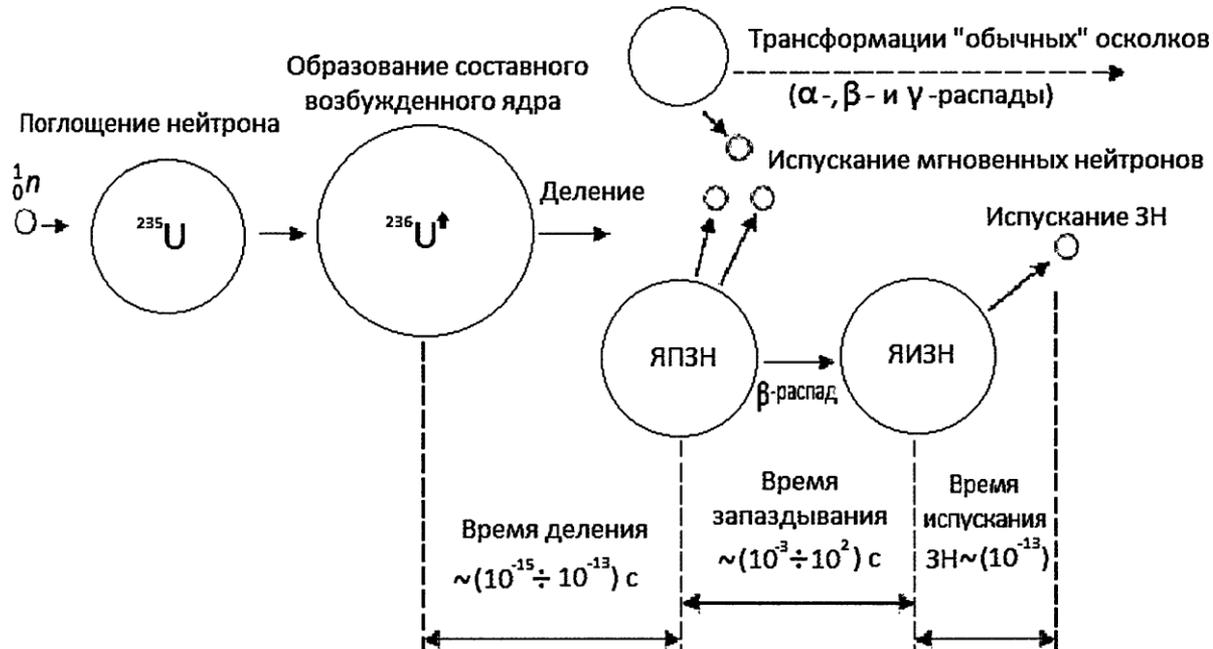


Схема генерации мгновенных и запаздывающих нейтронов в делениях ядер U-235 : ЗН - запаздывающий нейтрон; ЯПЗН - ядро-предшественник запаздывающего нейтрона; ЯИЗН - ядро-источник запаздывающего нейтрона

Мгновенные и запаздывающие нейтроны и их характеристики



Суммарные доли запаздывающих нейтронов при делении различных ядер нейтронами разных энергий:

Деление	Ядро				
	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu	^{232}Th	^{238}U
Тепловые нейтроны	0,0026	0,0064	0,0021	—	—
Быстрые нейтроны	0,0026	0,0060	0,0020	0,0190	0,0155

Запаздывающие нейтроны характеризуется своей средней энергией. Если выполнить усреднение энергии запаздывающих нейтронов, то получится, что средняя энергия запаздывающих нейтронов составляет около 0,5МэВ. Это примерно в 4 раза меньше средней энергии мгновенных нейтронов ($E_{мгн} \approx 2\text{МэВ}$).

Так как исходная энергия запаздывающих нейтронов меньше, чем мгновенных, то вероятность избежать утечку у них выше. Это свойство запаздывающих нейтронов характеризуется так называемой ценностью запаздывающих нейтронов.

Различие ценности запаздывающих и мгновенных нейтронов учитывается фиктивным увеличением доли запаздывающих нейтронов. Эффективная доля (доля не покинувших активную зону) запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$ превышает фактическую β (долю всех запаздывающих нейтронов).

Величина ценности запаздывающих нейтронов является характеристикой не запаздывающих нейтронов, а реактора, поскольку соотношение вероятностей избежания утечки при замедлении для мгновенных и запаздывающих нейтронов определяется только размерами и формой реактора.

Мгновенная критичность реактора - источник ядерной опасности.
Коэффициент размножения на мгновенных нейтронах

Смысл этого понятия тот же, что и у эффективного коэффициента размножения, только применительно к одним мгновенным нейтронам: отношение количеств мгновенных нейтронов рассматриваемого и непосредственно предшествующего ему поколений.

Мгновенной критичностью реактора называют его состояние, в котором он критичен на одних мгновенных нейтронах.

Очевидным условием мгновенной критичности реактора является условие:

$$K_{\text{эффм}}=1$$

Реактор переходит в состояние мгновенной критичности тогда, когда ему сообщается положительная реактивность величиной, большей или равной величины эффективной доли выхода запаздывающих нейтронов.

Понятие мгновенной критичности реактора является основой для понимания специфической для реакторных установок физической опасности - опасности возникновения неуправляемого увеличения мощности реактора при сообщении ему больших положительных реактивностей.

Проблема обеспечения ядерной безопасности является самой важной проблемой эксплуатации ядерных энергетических установок. Она накладывает свой отпечаток на все стороны процесса эксплуатации реакторных установок: транспортировка и загрузка в активную зону реактора ядерного топлива, физический пуск реактора, эксплуатационные пуски, режимы работы реактора на мощности, останов реактора, перезарядка активной зоны и многое другое.

Основное ограничение, на базе которого формулируется обеспечение ядерной безопасности, вытекает из требования:

Ни при каких обстоятельствах реактору не должна сообщаться положительная реактивность, близкая к величине эффективной доли запаздывающих нейтронов.

Положительные реактивности, сравнимые по величине с эффективной долей выхода запаздывающих нейтронов в реакторе - большие реактивности. Реактивности, меньшие величины Вэфф по крайней мере на порядок, - малые реактивности.

Величина реактивности реактора, численно равная эффективной доле выхода запаздывающих нейтронов в нём, может служить в качестве естественной и удобной единицы измерения реактивности для любых реакторов.

Эффекты реактивности



Реактивность реактора ρ и эффективный коэффициент размножения зависят от баланса нейтронов в реакторе. Баланс нейтронов в реакторе определяется как отношениями сечений взаимодействия нейтронов с ядрами, так и геометрическими размерами активной зоны реактора (утечка нейтронов из реактора).

Изменение технологических параметров реактора (температура, расход теплоносителя, давление, расположение поглощающих стержней в активной зоне и др.) оказывает влияние на соотношение сечений реакций и на размеры активной зоны. Таким образом, изменение технологических параметров реактора оказывает влияние и на реактивность реактора.

Связь между технологическим параметром и реактивностью количественно характеризуют либо коэффициентом реактивности, либо эффектом реактивности. Эффект реактивности называют положительным, если при увеличении параметра реактивность растёт, и отрицательным, если при увеличении параметра реактивность падает.

Эффекты реактивности

Температурный эффект реактивности. Изменение реактивности, обусловленное изменением температуры всех компонентов активной зоны от температуры в холодном состоянии до температуры в горячем состоянии

Этот эффект проявляется при однородном изменении температурного режима реактора и определяется температурой компонентов, формирующих спектр нейтронов и влияющих на утечку нейтронов:

- Изменением размеров и геометрии активной зоны;
- Изменением ядерно-физических свойств материалов;
- Изменением плотности теплоносителя

Для количественной оценки ТЭР применяется температурный коэффициент реактивности - это изменение реактивности, соответствующее изменению температуры активной зоны на 1 °С.

$$\rho_T = \rho(T_1) - \rho(T_2).$$

Эффекты реактивности

Мощностной эффект реактивности. Изменение реактивности, обусловленное возрастанием мощности реактора при сохранении остальных условий неизменными.

$$\rho_N = \rho(N_1) - \rho(N_2) \quad .$$

При изменении мощности реактора происходит неоднородный разогрев активной зоны, поэтому в основном мощностной эффект реактивности определяется температурой топлива и наличием в нём ^{238}U , у которого при повышении температуры увеличивается поглощение нейтронов вследствие эффекта Доплера.

Эффекты реактивности

Два основных эффекта реактивности определяют устойчивость, регулируемость и безопасность ядерного реактора. Условием устойчивой работы реактора (саморегулирования) является отрицательный температурный коэффициент реактивности в области рабочих температур. Мощностной коэффициент реактивности должен быть отрицательным во всём диапазоне изменения мощности. В этом случае может быть обеспечена безопасность даже при небольшом положительном температурном коэффициенте реактивности. Обычно мощностной коэффициент реактивности на порядок меньше температурного коэффициента реактивности. Однако при быстром переходном процессе их вклад примерно одинаков.

Спасибо за внимание

Чередов Вячеслав Михайлович
Инженер-технолог (по ЯБ), ведущий ОЯБ АО «СХК»

Моб. тел.: +7 (952) 899 99 37
E-mail: vmcheredov@rosatom.ru

30.05.2022