

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

На практике перевод ядерной энергии в тепловую (и в электрическую) проводят на устройствах, называемых ядерными реакторами.

Ядерный (атомный) реактор - устройство, в активной зоне которого осуществляется контролируемая самоподдерживающаяся цепная реакция деления ядер некоторых тяжелых элементов под действием нейтронов. Эта реакция представляет собой самоподдерживающийся процесс деления ядер изотопов урана (или делящихся изотопов других элементов) под действием нейтронов, которые благодаря отсутствию электрического заряда легко проникают в атомные ядра.

Замечание. В рамках концепции ядерного нераспространения под ядерными реакторами, понимают устройства, способные работать в режиме контролируемой самоподдерживающейся цепной реакции деления. Из данного класса исключаются реакторы нулевой мощности, которые определяются как реакторы с проектным максимальным уровнем производства плутония, не превышающим 100 граммов в год.

Термин «Ядерный реактор» включает узлы, находящиеся внутри корпуса реактора или непосредственно примыкающие к нему, оборудование, которое контролирует уровень мощности в активной зоне, и компоненты, которые обычно содержат теплоноситель первого контура активной зоны реактора, или вступают с ним в непосредственный контакт или управляют им.

Ядерный реактор в целом содержит:

(А) **Активную зону**, состоящую из:

(1) Топлива (делящегося или воспроизводящего). Оно может быть растворено или рассеяно в замедлителе (гомогенный реактор) или сконцентрировано в топливных элементах (кассетах) (гетерогенные реакторы).

(2) Замедлителя и, в необходимых случаях, отражателя нейтронов (например, бериллий, графит, вода, тяжелая вода, определенные углеводороды, такие как дифенил или терфенилы).

(3) Теплоносителя. Он служит для отвода тепла, генерируемого реактором (двуокись углерода, гелий, вода, тяжелая вода, расплавленный натрий или висмут, расплавленные смеси натрия и калия, расплавленные соли, определенные углеводороды и пр.). Замедлитель, однако, также часто действует как теплоноситель.

(4) Управляющих стержней, выполненных из материала с высокой способностью к поглощению нейтронов (например, бор, кадмий, гафний) или из сплавов и соединений на основе такого материала. Сюда относятся специально предназначенные или подготовленные стержни, опорные или подвесные конструкции для них, механизмы привода стержней или направляющие трубы стержней для управления процессом деления в ядерных реакторах.

(5) Трубы высокого давления ядерных реакторов, предназначенные для размещения в них топливных элементов и теплоносителя первого контура в реакторах при рабочем давлении, превышающем 50 атмосфер.

(6) Трубы или сборки труб из металлического циркония или его сплавов, которые специально предназначены или подготовлены для использования в реакторах и в которых отношение по весу гафния к цирконию меньше чем 1:500.

(Б) **Механическую структуру** (например, металлический корпус реактора, машины для загрузки и выгрузки топливных элементов, трубопроводы для транспортировки теплоносителя, клапаны, механизм установки управляющих стержней и пр.).

Замечание. Манипуляторное оборудование, специально предназначенное для загрузки или извлечения топлива из ядерных реакторов, способно производить операции по перегрузке на мощности или обладают техническими возможностями для точного позиционирования или ориентирования, позволяющими проводить на остановленном реакторе сложные работы по перегрузке топлива, при которых обычно невозможны непосредственное наблюдение или прямой доступ к топливу.

(В) Измерительные, контрольные и управляющие **приборы** (например, детекторы нейтронов, ионизационные камеры, термодатчики, телекамеры, манометры или расходомеры). Внутризонные и внезонные измерительные приборы измеряют уровни потока в широком диапазоне, от 10^4 нейтронов на см^2 в секунду до 10^{10} нейтронов на см^2 в секунду или более. К внезонным относятся измерительные приборы за пределами активной зоны реакторов, расположенные внутри биологической защиты.

(Г) Тепловых и биологических **экранов** (из стали, бетона, свинца и пр.). В ядерной установке могут использоваться и некоторые другие устройства и приспособления, которые могут даже быть установлены внутри зоны, огораживаемой экранами биологической защиты.

Замечание. К реакторным материалам относятся дейтерий, тяжелая вода (окись дейтерия) и любое другое соединение дейтерия, в котором отношение дейтерия к атомам водорода превышает 1:5000, а также Ядерно-чистый графит, имеющий степень чистоты выше 5-миллионных борного эквивалента, с плотностью больше чем $1,50 \text{ г/см}^3$. (Борный эквивалент (БЕ) может быть определен экспериментальным путем или рассчитан как сумма BE_Z для примесей (за исключением $\text{BE}_{\text{углерод}}$, поскольку углерод не считается примесью), включая бор, где: i) $\text{BE}_Z (10^{-4}) = \text{CF} \times \text{концентрация элемента } Z (10^{-4})$; ii) CF - коэффициент пересчета: $(\sigma_Z \times \text{AB})$ деленное на $(\sigma_B \times \text{AZ})$; iii) σ_B и σ_Z - сечения захвата тепловых нейтронов (в барнах) для природного бора и элемента Z , соответственно.

Основными элементами атомного энергетического реактора являются активная зона, отражатель нейтронов, окружающий активную зону, стержни-поглотители нейтронов, обеспечивающие управление

реактором (поддержание энергии на нужном уровне и обеспечение равномерности ее распределения по объему реактора) и аварийную защиту, биологическая защита реактора. Реактор заключен в герметичный металлический корпус (здесь же находится теплообменник). Активная зона реактора содержит в себе ядерное горючее (в реакторах на тепловых нейтронах активная зона содержит также замедлитель нейтронов и некоторые другие компоненты). В ней протекает управляемая цепная ядерная реакция и выделяется энергия деления (в основном – в виде тепловой). Выделенная энергия отводится с помощью теплоносителя. При необходимости, тепловая энергия превращается в электрическую либо с помощью тепловых преобразователей, вмонтированных непосредственно в реактор, или с помощью специального теплоносителя, уносящего тепло к внешнему электрогенератору.

Природа, характерные особенности и способ сборки компонентов ядерных реакторов могут, однако, существенно различаться. Различные типы реакторов в целом различаются по:

- (1) Энергии нейтронов, распространяющих цепную реакцию (реакторы на тепловых (или медленных), промежуточных или быстрых нейтронах);
- (2) Распределению делящегося материала по активной зоне реактора (например, гомогенные реакторы и гетерогенные реакторы);
- (3) Области применения (например, исследовательские реакторы, реакторы, производящие изотопы, реакторы для испытания материалов, реакторы для переработки воспроизводящего материала в делящийся - конвертеры или брудеры, реакторы двигательных установок, реакторы, производящие тепловую или электрическую энергию);
- (4) Природе применяемых материалов или принципу работы (например, природный уран, обогащенный уран, уран-торий, натрий-графит, газ-графит, вода под давлением, тяжелая вода под давлением, кипящая вода, бассейновые реакторы и реакторы с органическим замедлителем).

Размер реактора рассчитывается так, чтобы он был по меньшей мере **«критическим»**, с тем, чтобы любая потеря нейтронов ввне никогда не была бы достаточной, чтобы прервать цепную реакцию. Однако для исследовательских целей иногда могут применяться **«субкритические»** реакторы, требующие дополнительных источников нейтронов. Управляющие рычаги и соответствующие механизмы, источники нейтронов, предназначенные для инициирования реакции деления, корпус реактора, решетка для ввода топливных элементов и устройства для повышения давления воды, также являются составными компонентами ядерного реактора.

Теоретически возможны более 100 разных типов реакторов, различающихся топливом, замедлителем и теплоносителями. Среди них: реакторы на быстрых нейтронах, т.е. реакторы, не использующие замедлители; охлаждаемые теплоносителем, не находящимся под давлением, например реакторы бассейнового типа; реакторы на тепловых нейтронах; гетерогенные реакторы, т.е. реакторы с разделенными ядерным топливом и замедлителем; реакторы насыпного типа; реакторы с гранулированным топливом, с замедлителем, находящимся под высоким давлением, например, реакторы с кипящей водой; реакторы с общим перегревом; реакторы, охлаждаемые водой под давлением, с различными и (или) разделенными замедлителем и теплоносителем, с твёрдым замедлителем; с замедлителем, не находящимся под давлением, например реакторы бассейнового типа; с различными и (или) разделенными замедлителем и теплоносителем, например натрий-графитовые реакторы; с теплоносителем, находящимся под давлением; с жидким замедлителем, например реакторы с трубами высокого давления; с жидким или газообразным топливом; гомогенные реакторы, т.е. реакторы, в которых ядерное топливо и замедлитель являются однородной средой по отношению к потоку нейтронов; реакторы с одной зоной; реакторы с двумя зонами; подкритические реакторы; интегральные реакторы, т.е. реакторы, в которых части функционально связанные с реактором, не являются существенными для реакции, например теплообменники, расположенные внутри корпуса с активной зоной и др. Выделяют четыре группы ядерных реакторов:

1. Ядерные реакторы, использующиеся в качестве источников электрической и тепловой энергии (энергетические);
2. Ядерные реакторы, использующиеся для получения различных видов излучения (в том числе исследовательские);
3. Промышленные реакторы военного назначения, производящие оружейный плутоний;
4. Ядерные реакторы – размножители, наработчики новых радионуклидов, в том числе – нового ядерного топлива, трансплутониевых элементов, энергетического плутония и т.п. (реакторы – конвертеры и реакторы – брудеры).

Основные типы энергетических ядерных реакторов:

- электрические ядерные реакторы АЭС (используются для выработки тепловой энергии, преобразующейся с помощью турбогенераторов в электрическую)
- электроэнергетические (термоэлектрические или термоэмиссионные) ядерные реакторы (с безмашинным преобразованием тепловой энергии в электрическую);

- высокотемпературные теплоэнергетические ядерные реакторы для АСТ (производят высокопотенциальную тепловую энергию, непосредственно используемую в химической или металлургической промышленности для осуществления различных химических реакций, опреснения морской воды или получения энергоносителей, например, водорода);
- теплоэнергетические ядерные реакторы (производят тепловую энергию на атомных станциях теплоснабжения, предназначены для промышленной и бытовой теплофикации)

К энергетическим реакторам относятся также судовые, или транспортные ядерные реакторы; реакторы ядерных ракетных двигателей; двухцелевые электроэнергетические реакторы - размножители, вырабатывающие тепловую энергию и ядерные материалы, которые могут быть использованы для производства нового ядерного топлива; термоэмиссионные реакторы-преобразователи космических ядерно-энергетических установок (в том числе – генерирующих лазерное излучение). В последние годы проводятся работы по созданию лазеров с ядерным возбуждением. Изучаются перспективы использования импульсных ядерных реакторов для возбуждения рентгеновских и гамма-лазеров.

Основные типы ядерных реакторов для получения различных видов излучения:

- исследовательские ядерные реакторы (служат источниками нейтронного и гамма-излучения для научных и технических целей, в частности облучения реакторных материалов - материаловедческие реакторы)
- промышленные ядерные реакторы (используются для производства плутония и других делящихся радиоактивных изотопов)
- облучательные ядерные реакторы (предназначены для обработки материалов нейтронным или гамма-излучением в целях улучшения их свойств)
- хемоядерные реакторы, использующие излучение для ускорения химических реакций
- реакторы-источники нейтронов для активационного анализа нуклидного состава материалов
- реакторы для биомедицинских целей и обработки пищевых продуктов
- импульсные реакторы-гамма-лазеры, в которых энергия излучения, включая энергию осколков деления, используется для накачки энергии в активное вещество лазеров.

Замечание. Часто реактор совмещает несколько функций. Например, исследовательский реактор СМ, дающий самую большую в мире плотность потоков тепловых нейтронов, позволяет решать проблемы ядерной физики и материаловедения, и одновременно нарабатывать тяжёлые актиниды (вплоть до эйнштейния), в том числе – военного назначения.

Ядерные реакторы подразделяются на различные типы не только по назначению, но и по физическим, техническим и эксплуатационным признакам.

По физическим признакам различают реакторы на тепловых и быстрых нейтронах; реакторы уранового, плутониевого или ториевого цикла; реакторы – размножители (бридеры).

Техническая классификация проводится по признакам:

- вид теплоносителя и замедлителя (водяные тепловые ядерные реакторы с легководным, тяжеловодным или графитовым замедлителем, реакторы на быстрых нейтронах с натриевым или гелиевым теплоносителем, реакторы с органическим теплоносителем и замедлителем);
- агрегатное состояние водного теплоносителя (водо-водяные энергетические реакторы с водой под давлением, газовые реакторы, пароохлаждаемые реакторы на быстрых нейтронах);
- элемент, в котором создается давление теплоносителя (корпусные, канальные, канально-корпусные ядерные реакторы);
- число контуров теплоносителя (реакторы однокорпусные, с прямым паро- или газотурбинным циклом, двухкорпусные с парогенератором и трехкорпусные - с промежуточным контуром, отделяющим первый реакторный контур от паросилового контура);
- структура и форма активной зоны (гетерогенные и гомогенные ядерные реакторы с активными зонами в форме цилиндра, параллелепипеда или сферы);
- время действия (ядерные реакторы непрерывного действия, импульсные, прерывистого действия).

Реакторы классифицируются по типу используемого теплоносителя. Упомянем основные из них:

Реактор с водой под давлением. В таких реакторах замедлителем и теплоносителем служит вода. Нагретая вода перекачивается под давлением в теплообменник, где тепло передается воде второго контура, в котором вырабатывается пар, вращающий турбину.

Кипящий реактор. В таком реакторе кипение воды происходит непосредственно в активной зоне реактора и образующийся пар поступает в турбину. В большинстве кипящих реакторов вода используется и как замедлитель, но иногда применяется графитовый замедлитель.

Реактор с жидкометаллическим охлаждением. В таком реакторе для переноса теплоты, выделяющейся в процессе деления в реакторе, используется жидкий металл, циркулирующий по трубам. Почти во всех реакторах этого типа теплоносителем служит натрий. Пар, образующийся на другой стороне труб первого контура, подается на обычную турбину. В реакторе с жидкометаллическим охлаждением могут использоваться нейтроны со сравнительно высокой энергией (реактор на быстрых нейтронах) либо

нейтроны, замедленные в графите или оксиде бериллия. В качестве реакторов-размножителей более предпочтительны реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением, поскольку в этом случае отсутствуют потери нейтронов, связанные с замедлением.

Газоохлаждаемый реактор. В таком реакторе теплота, выделяющаяся в процессе деления, переносится в парогенератор газом – диоксидом углерода или гелием. Замедлителем нейтронов обычно служит графит. Газоохлаждаемый реактор может работать при гораздо более высоких температурах, нежели реактор с жидким теплоносителем, а потому пригоден для системы промышленного теплоснабжения и для электростанций с высоким кпд. Небольшие газоохлаждаемые реакторы отличаются повышенной безопасностью в работе, в частности отсутствием риска расплавления реактора.

Гомогенные реакторы. В активной зоне гомогенных реакторов используется однородная жидкость, содержащая делящийся изотоп урана. Жидкость обычно представляет собой расплавленное соединение урана. Она закачивается в большой сферический сосуд, работающий под давлением, где в критической массе происходит цепная реакция деления. Затем жидкость подается в парогенератор.

В ядерном реакторе используется либо обогащенный уран с замедлителем, поглощающим нейтроны, либо необогащенный уран с замедлителем, мало поглощающим нейтроны, либо сплав плутония с ураном без замедлителя. Для предотвращения утечки нейтронов за пределы реактора, а также для возвращения нейтронов в активную зону реактора используются отражатели нейтронов.

Активная зона - центральная часть реактора, в которой протекает самоподдерживающаяся цепная реакция деления и выделяется энергия.

Отражатель - материал, предназначенный для уменьшения утечки нейтронов из реактора. В реакторах на тепловых нейтронах он выполняется из тех же материалов, что и замедлитель. В быстрых реакторах в качестве отражателя - экрана используются материалы (Th-232 или U-238), которые при взаимодействии с нейтронами образуют делящиеся нуклиды.