

Особенности ядерного реактора как источника энергии

Жизнь и деятельность человека сопряжены с потенциальной опасностью неблагоприятных воздействий на него:

1. природных явлений (землетрясений, наводнений, ураганов и т. п.),
2. освоенных им источников энергии (механических, электрических, химических и др.
3. социальных явлений (войн, эпидемий и т. п.), которые наносят материальный ущерб, причиняют вред здоровью человека и окружающей среде.

Это в полной мере относится и к ядерной энергетике, причем, поскольку ЯР - один из самых мощных современных источников энергии, в основе работы которого лежат процессы внутриядерных взаимодействий, эта опасность имеет специфические особенности, связанные, в конечном счете, с распространением радиоактивности в окружающую среду на различных этапах ядерного топливного цикла (добыча урана, обогащение, изготовление ТВЭЛов, загрузка топлива, облучение его в ЯР и выгрузка, выдержка, транспортировка, регенерация и захоронение отходов). Хотя ЯР обладает довольно существенными преимуществами по сравнению с другими источниками энергии, ему присущи свойства, которые требуют особого, очень внимательного к нему отношения. Для безаварийной эксплуатации ЯР необходимо хорошо знать эти свойства и всегда о них помнить. Главные из них следующие:

1. ЯР - мощный источник ионизирующего излучения как при работе н мощности, так и после его остановки. Это требует принципиально нового подхода к решению многих вопросов при проектировании эксплуатации ЯР. Прежде всего, необходимы: специальные средства биологической, радиационной и тепловой защиты, контроля радиационной обстановки; средства борьбы с распространением радиоактивных загрязнений в аварийных ситуациях; дистанционное управление механизмами, находящимися в местах повышенной радиоактивности. Особого внимания в связи с радиоактивностью продуктов деления заслуживает вопрос надежности ТВЭЛов.

2. Ядерное топливо обладает колоссальной энергоемкостью, в миллионы раз превышающей энергоемкость органического топлива. Например, загрузке $\sim 100\text{кг } ^{235}\text{U}$ в судовом ЯР соответствует $\sim 200\text{тыс.т.}$ органического топлива, а загрузке $\sim 1\text{т } ^{235}\text{U}$ в ЯР АЭС соответствуют миллионы тонн. При этом следует учитывать, что для сгорания тонны органического топлива нужно сжечь $\sim 2,5\text{ т}$ кислорода, который вместе с продуктами горения топлива дает очень вредные оксиды углерода, серы, азота, углеводороды и твердые частицы, уходящие в атмосферу и выпадающие на землю. В 2000-м году от всех работающих в мире ТЭС выпало на землю около двух миллиардов тонн этой грязи. ТЭС мощностью 3000 МВт требует в сутки 100-200 вагонов угля, а АЭС такой же мощности всего несколько килограмм ядерного топлива. Причём продукты горения ядерного топлива все остаются в активной зоне ЯР, но создают очень большую, опасную концентрацию радиоактивных веществ, которые в некоторых аварийных ситуациях могут оказаться вне ЯР..

3. Большая концентрация энергии в ядерном топливе позволяет получить мощность в активной зоне значительно больше той, которую можно отвести с помощью теплоносителя. Для ЯР проблема заключается не в том, какую энергию можно в нем получить, а в том, какую энергию можно использовать, оставляя ЯР работоспособным в течение заданной кампании. Это накладывает большие ограничения на многие параметры ЯР, отклонение которых от установленных пределов может привести к выходу из строя активной зоны со всеми вытекающими отсюда последствиями. Главное условие обеспечения работоспособности ТВЭЛов - соблюдение теплового баланса между тепловыделением и теплосъемом в активной зоне.

4. Есть принципиальное различие в способе управления реакциями горения органического и ядерного топлива. В первом случае управление осуществляется подачей топлива, а само горение фактически неуправляемо: горит все поступающее топливо. В ЯР горение (деление) ядерного топлива происходит во всем объеме, загруженного в ЯР на всю кампанию, и управлять цепной реакцией нужно так, чтобы делилось столько ядер, сколько нужно использовать энергии. Последствия при выходе из-под контроля развития ЦР в ЯР весьма серьезны. Поэтому вопросу обеспечения управляемой ЦР должно придаваться первостепенное значение.

5. ЯР может стать неуправляемым. Допустимая реактивность - основной параметр регулирования - имеет небольшое строго ограниченное значение: $\rho < \beta_{\text{эф}}$, при этом даже в управляемом диапазоне изменения ρ приемлемой скорости изменения мощности ЯР соответствует ρ в несколько раз меньше $\beta_{\text{эф}}$. Это требует особого внимания к управлению и прежде всего к пуску ЯР, как одному из наиболее ответственных режимов.

6. Реактивность ЯР изменяется не только в результате перемещения органов

регулирования, но и вследствие внутренних эффектов и процессов, сопровождающих работу ЯР (температурный эффект, отравление и др.). Это изменение может значительно (в несколько раз) превышать $\beta_{эф}$. Поэтому, учитывая жесткие ограничения, накладываемые на величину p , при которой мощность изменяется с допустимым периодом разгона, следует очень точно поддерживать параметры ЯР в заданных пределах при работе на стационарном уровне и особенно в переходных режимах, в том числе после остановки ЯР, когда вследствие отрицательных α_N и α_t , а также из-за распада Хе может произойти самопроизвольный выход ЯР в критическое и надкритическое состояние. Необходимо также перед пуском ЯР рассчитывать критическое положение органов регулирования, учитывая возможность попадания в йодную яму. Нужно иметь в виду, что вследствие температурного эффекта изменение практически всех параметров ЯЭУ (расхода теплоносителя и питательной воды, давления пара, вакуума в конденсаторе турбины и т. п.) влияет на p . В связи с этим многие монтажные и ремонтные работы, которые могут привести к изменению p , относят к *потенциально ядерно-опасным работам* (ПЯОР, ЯОР, ПОР) и проводят их при тщательном контроле за состоянием ЯР.

7. Следует иметь в виду также такую особенность ЯР на тепловых нейтронах, как наличие большого $p_{зап}$ в конце кампании при выгрузке топлива или в течение кампании при частичной перегрузке. Это объясняется тем, что из всего $p_{зап}$ безвозвратно расходуется только часть, предназначенная для компенсации выгорания, шлакования и стационарного отравления Sm. Остальной $p_{зап}$ необходим для обеспечения работы ЯР на энергетическом уровне (компенсация отравления Хе, отрицательных α_t , α_N и других эффектов). После остановки ЯР эта часть $p_{зап}$ высвобождается, и, следовательно, необходимо его компенсировать подвижным или жидким поглотителем, а выгружаемое топливо, содержащее большое количество делящихся нуклидов, должно идти на переработку. С точки зрения безопасности ядерного реактора при перегрузке он так же потенциально опасен, как и при загрузке свежего топлива и даже больше, т. к. все компоненты работавшего ЯР радиоактивны.

8. Радиоактивность продуктов деления обуславливает остаточное тепловыделение в активной зоне в течение продолжительного времени после остановки ЯР и при хранении отработавшего топлива. Необходимы специальные системы охлаждения ЯР после плановой и особенно аварийной остановок, исключающих возможность расплавления твэлов в не работающем ЯР. После остановки предусматривается специальный режим расхолаживания ЯР.

9. Отдельной проблемой, но непосредственно связанной с ядерной энергетикой, является регенерация топлива и захоронение радиоактивных отходов ядерного производства.

Отмеченные здесь особенности не исчерпывают всего разнообразия свойств ЯР, но именно они в первую очередь определяют требования к эксплуатации ЯЭУ на всех нормальных и аварийных режимах, начиная с первого пуска и кончая перегрузкой активной зоны. На первый план при этом выходит проблема безопасности ЯЭУ, связанная с возможностью аварийного выделение радиоактивных продуктов деления в таких количествах, которые опасны для окружающего населения и прежде всего для обслуживающего персонала. Говоря о безопасности ЯЭУ в самом широком смысле, подразумевают способность ее не допустить реализации такой потенциальной возможности. Это условие учитывается уже на этапах расчета, при проектировании и конструировании ЯЭУ. Концепция безопасности ЯЭУ строится на принципе *глубоко эшелонированной защиты* («защита в глубину»), способной предотвратить или значительно ослабить аварию в случае отказа оборудования или ошибки оператора. Эшелонированная защита предполагает наличие нескольких *уровней* и *барьеров безопасности*:

Первый уровень - это надежность самой реакторной установки с запасом до предельно допустимых отклонений параметров. Этот уровень обеспечивается консервативностью проекта и высоким качеством его исполнения. Консервативность заключается в том, что при расчете пределы параметров принимаются с запасом в безопасную сторону.

Второй уровень предполагает возможность надежного управления при нарушениях эксплуатации и выявлении отказов оборудования.

Третий уровень характеризуется наличием системы аварийной защиты для обнаружения и предотвращения развития аварийных процессов путем остановки ЯР или ограничения мощности при возникновении аварийных отклонений параметров, способных привести ЯР к выводу из строя. Третий уровень должен предотвратить развитие отказов

оборудования и ошибок персонала в *проектные* аварии, а проектных - в *тяжелые запроектные*.

Четвертый уровень — это возможность управления аварией.

Пятый уровень предусматривает специальные системы и меры защиты, обеспечивающие безопасность населения в случае крайне маловероятной (запроектной) аварии или, по крайней мере, уменьшающие ее последствия.

Очень важно добиться *культуры безопасности* всех занятых в ядерной энергетике. Это квалификационная и психологическая подготовленность всех лиц, при которой обеспечение безопасности является приоритетной целью и внутренней потребностью, приводящей к самосознанию ответственности и к самоконтролю при выполнении всех работ, влияющих на безопасность. Культура безопасности формируется путем подбора и обучения персонала в каждой сфере деятельности, влияющей на безопасность; установлением персональной ответственности и строгим соблюдением дисциплины руководителями всех рангов и исполнителями.

Барьерами защиты, обеспечивающими безопасность на различных уровнях, являются:

- 1) топливная композиция - матрица твзла, удерживающая продукты деления;
- 2) герметичная оболочка топливных стержней;
- 3) граница первого контура (корпус ЯР и трубопроводы теплоносителя);
- 4) наружная защитная оболочка реакторной установки.

В соответствии с принципом эшелонированной защиты должны быть предусмотрены системы безопасности, предназначенные для:

- аварийной остановки ЯР и поддержания его в подкритическом состоянии;
- аварийного отвода тепла от активной зоны;
- удержания радиоактивных продуктов в установленных границах;
- уменьшения последствий запроектных аварий..

Системы и элементы безопасности по характеру выполняемых функций разделяются на:

- **защитные** (для предотвращения или ограничения повреждений ядерного топлива, оболочек твэлов, оборудования и трубопроводов, содержащих радиоактивные продукты);
- **локализующие** (для предотвращения или ограничения распространения выделяющихся при аварии радиоактивных веществ и излучений за установленные границы);
- **обеспечивающие** (для предотвращения снабжения систем безопасности энергией, рабочей средой и создания условий их функционирования);
- **управляющие** (для инициирования действий систем безопасности и управления ими).

После введения ЯЭУ в действие главными условиями ее безопасной работы являются строгое выполнение всех требований технологического регламента, высокая профессиональная подготовка операторов, глубокое понимание физико-теплотехнических процессов, сопровождающих работу ЯР во всех режимах и особенно в аварийных. Поскольку потенциальная опасность внутренне присуща всякой установке, безопасность нужно обеспечивать. Для этого необходимо выработать *требования* (условия, обязательные для выполнения) и *мероприятия* (действия для выполнения требований) по обеспечению безопасности. Эксплуатационные требования безопасности предусматривают мероприятия, исключающие возможность превышения допустимых значений параметров установки и выход из строя механизмов, без которых невозможна дальнейшая эксплуатация.

Согласно «Общим положениям безопасности атомных станций» *безопасность атомных станций* (АС) - это свойство АС при нормальной эксплуатации и в случае аварии ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами. Уровень безопасности считается приемлемым, если обеспечено соблюдение требований специальных норм и правил.

Техническая безопасность АС - это достигаемое техническими средствами и организационными мерами качество АС, характеризующее прочностью оборудования, повреждение которого может привести к нарушению отвода тепла от активной зоны ЯР, а также качество, характеризующее способностью удерживать в герметичной зоне АС выделившиеся при указанных повреждениях радиоактивные вещества.

Особо необходимо выделить специфические требования по ядерной и

радиационной безопасности ЯР.

Ядерная безопасность подразумевает исключение возможности возникновения *ядерной аварии* и обеспечение *теплотехнической надежности* активной зоны, т. е. создание таких условий эксплуатации, чтобы зона выполняла свои функции в течение гарантированной кампании и исключалась возможность появления в теплоносителе недопустимых количеств радиоактивных продуктов деления во всех режимах работы ЯР, в том числе аварийных. Нарушение теплового баланса между тепловыделением и теплоотводом от ТВЭЛов является ядерно-опасной ситуацией, т. е. одной из причин возникновения ядерной аварии.

Требования *радиационной безопасности* сводятся к обеспечению нормальной радиационной обстановки для работы обслуживающего персонала и для окружающей среды в любых условиях эксплуатации.

Безопасность ядерной энергетики (техническая, ядерная и радиационная) должна быть гарантирована на всех этапах использования ядерного топлива!

Обозначения, используемые для различных типов ядерных реакторов

1. *Бридер* — реактор-размножитель, в котором сжигаемое и воспроизводимое топливо представляет собой изотопы одного и того же химического элемента (например, сжигается ^{235}U , а воспроизводится ^{233}U). *Быстрый {на быстрых нейтронах}* — ЯР, в котором ЦР деления ядерного топлива осуществляется быстрыми нейтронами. В нем отсутствует замедлитель. В качестве топлива используется плутоний или обогащенный уран. Имеет небольшие габариты активной зоны. *Водоводяной (ВВР, LWR)* - ЯР, в котором вода одновременно является замедлителем нейтронов и теплоносителем. Есть два типа ВВР: кипящие (ВВРК, ВК, ВВР) и под давлением (ВВРД, РВР). Энергетические ВВР под давлением являются основным типом ЯР для АЭС в СССР (ВВЭР) и в мире (РВР).

2. *Водо-графитовый* - ЯР на тепловых нейтронах с графитовым замедлителем и водяным теплоносителем.

3. *Воспроизводящий* - ЯР, в котором одновременно с выгоранием первично загруженных делящихся нуклидов ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu происходит накопление нового (вторичного) топлива из ядерного сырья (^{238}U , ^{232}Th) в виде делящихся нуклидов (^{239}Pu , ^{233}U). При $\text{KB} > 1$ такие ЯР называют размножителями (бридеры или конвертеры).

4. *Высокотемпературный газовый (ВТГР, НТР)* - ЯР на тепловых нейтронах с графитовым замедлителем и газовым теплоносителем (обычно гелием), предназначенный для получения высокопотенциального тепла (до 1000°C) с непосредственным использованием его в энергоемких отраслях промышленности - химии, металлургии. *Газофазный* - ЯР с урановой плазмой при температуре 10^5 °C внутри цилиндрической полости, окруженной ураном, играющим роль и отражателя нейтронов. При давлении 50-И ООМПа создается критичность для ЦР, энергия деления передается лучистым теплообменом теплоносителю. Удобны для кратковременного использования в режиме ядерного ракетного двигателя.

5. *Гетерогенный* - ЯР, в котором топливо применяется в твердом виде и размещается в активной зоне отдельными блоками, окруженными замедлителем. Размеры блоков топлива и расстояние между ними больше длины свободного пробега нейтрона, т. е. среда активной зоны для нейтрона неоднородна

9. *Гибридный* - комбинация термоядерного реактора, являющегося источником нейтронов высоких энергий (~14МэВ), и реактора деления, состоящего из делящихся и сырьевых нуклидов - бланкета, расположенного вокруг термоядерного реактора. В бланкете происходит деление нуклидов, в том числе сырьевых, воспроизводство топлива и выделение тепла от торможения продуктов реакций синтеза и деления.

10. *Гомогенный* - ЯР, в котором активная зона состоит из смеси топлива и замедлителя в виде суспензии или жидкого раствора, который одновременно выполняет и функцию теплоносителя. Расстояние между ядрами топлива и замедлителя меньше длины пробега нейтрона.

11. *Гомогетерогенный* - ЯР, в котором активная зона является гетерогенной по отношению к твэлам и теплоносителю, а сами твэлы представляют собой твердую гомогенную смесь топлива и замедлителя.

12. *Жидкометаллический* - ЯР на быстрых или промежуточных нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, сплав натрия с калием и др.).

13. *Импульсный* - ЯР, генерирующий с определенной периодичностью кратковременные импульсы потока нейтронов и у-квантов длительностью от нескольких десятков микросекунд до нескольких секунд с полным числом нейтронов за импульс до 10^{20} . Используются в основном для изучения материалов и приборов в интенсивном излучении, а также для определения сечений взаимодействия нейтронов с ядрами различных веществ.

14. *Интегральный (моноблочный)* - ЯР, в корпусе которого расположено основное оборудование первого контура.

15. *Исследовательский* - ЯР, вырабатывающий нейтронное и у-излучение для научных и технических целей, в частности для облучения реакторных материалов (материаловедческий ЯР).

16. *Канальный* - гетерогенный ЯР, в активной зоне которого топливо и теплоноситель содержатся в отдельных герметичных каналах, способных выдержать необходимое давление теплоносителя. Замедлитель находится между каналами.

17. *Кипящий* - одна из разновидностей ВВР (ВК, ВWR), в активной зоне которого происходит кипение: часть воды превращается в пар, который после сепарации поступает непосредственно на турбину.

18. *Конвертер* - реактор-размножитель, в котором сжигаемое и воспроизводимое ядерное топливо представляет собой изотопы различных химических элементов (например, сжигается ^{235}U , а воспроизводится ^{234}Pu).

19. *Корпусной* - ЯР (типа ВВЭР), активная зона которого находится в стальном или предварительно напряженном железобетонном корпусе, способном выдержать необходимое давление теплоносителя и термические нагрузки. Компактен и относительно прост в эксплуатации.

20. *Магноксовый* — газографитовый ЯР с CO_2 и твэлами из природного урана в оболочке из сплава на основе магния - магнокса, слабо поглощающего нейтроны и позволяющего осуществить ЦР на природном уране.

21. *Многозонный* - ЯР с распределением (профилированием) концентрации топлива и ВП по активной зоне таким образом, чтобы энерговыделение было равномерным. В ЯР на быстрых нейтронах есть зоны размножения и зоны воспроизводства.

22. *Многоцелевой* - ЯР, предназначенный для одновременного решения нескольких задач, например: производства электроэнергии, опреснения морской воды и воспроизводства ядерного топлива (трехцелевой БН-350), или производства электроэнергии и тепла для централизованного теплоснабжения (двухцелевые АТЭЦ), или расширенного воспроизводства ядерного топлива и производства электроэнергии (БН-600, 1600) и др.

23. *Натриевый* - ЯР на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

24. *Облучательный* — неэнергетический ЯР, в котором используются нейтрон и у-излучение, энергия осколков деления для различных целей: обработки материалов для изменения их свойств; ускорения химических реакций; активационного анализа состава материалов; биомедицинского облучения; облучения пищевых продуктов; накачки энергии в активное вещество лазеров и др.

25. *Органический* - ЯР с органическим теплоносителем, имеющим более высокую температуру кипения, чем вода. В основном это углеводы, недостатком которых является радиационная и термическая нестойкость. Большое содержание углерода и водорода в органическом веществе позволяет использовать его одновременно и как замедлитель нейтронов для создания малогабаритных активных зон в органо-органических ЯР.

26. *Плутониевый* — ЯР, в котором в качестве топлива используется плутоний.

27. *Производящий {ядерно-химический}* - ЯР для производства больших

количеств делящихся (промышленный ЯР) или радиоактивных (изотопный ЯР) нуклидов.

28. *Промежуточный (резонансный)* - ЯР с незначительным количеством замедлителя, в связи с чем большинство делений ядер производят нейтроны промежуточных (резонансных) энергий, не успевающие замедлиться до тепловой энергии.

29. *Промышленный* - ЯР для получения под действием нейтронов и γ -излучения новых нуклидов и прежде всего вторичного ядерного топлива (^{239}Pu и ^{233}U из ^{238}U и ^{232}Th соответственно).

30. *Размножитель* — ЯР для производства ядерного топлива, имеющий $K_B > 1$.

31. *РБМК* - ЯР большой мощности канальный (кипящий) одноконтурный с графитовым замедлителем и водяным теплоносителем.

32. *Солевой* - гомогенный или гомогетерогенный ЯР, в первом контуре которого циркулирует расплавленная соль топлива и несущей среды, служащей теплоносителем или замедлителем или тем и другим одновременно.

33. *Тепловой (на тепловых нейтронах)* - ЯР с таким количеством замедлителя, в котором спектр нейтронов деления превращается в спектр тепловых нейтронов, производящих деление ядер топлива.

34. *Термоэлектрический* - ЯР-преобразователь, в котором тепло, возникающее в активной зоне, передается к термоэлектрическим преобразователям типа кремний-германиевых элементов, образующих генератор электроэнергии.

35. *Термоэмиссионный* - ЯР-преобразователь, в котором встроены электрогенерирующие каналы, преобразующие тепловую энергию в электрическую благодаря термоэлектронной эмиссии.

36. *Термоядерный* - разрабатываемое устройство, в котором при сверхвысоких температурах порядка 10^8C и выше происходят реакции слияния (синтеза) легких ядер (водорода, дейтерия, трития) в более тяжелые, сопровождающиеся выделением огромных количеств энергии.

37. *Транспортабельный* - малогабаритный реактор для передвижной (транспортабельной) ЯЭУ.

38. *Транспортный* - ЯР, используемый в качестве источника энергии установки, обеспечивающей движение транспортного средства (корабля, ракеты).

39. *Тяжеловодный* - ЯР, охлаждаемый кипящей или не кипящей, обычной или тяжелой водой с некипящим тяжеловодным замедлителем (ТВР, НВР, CANDU).

40. *Уран-графитовый* - ЯР с графитовым замедлителем и газовым или водяным теплоносителем.

41. *Урановый* - ЯР, в котором в качестве делящегося нуклида используется ^{235}U в виде природного ($x = 0,72\%$) или обогащенного ($95\% > x > 0,72\%$) урана.

42. *Уран-плутониевый* - ЯР с уран-плутониевым топливным циклом, в котором топливом является делящийся ^{235}U , воспроизводящий ^{238}U и воспроизводимый ^{239}Pu . Начальная критическая масса может быть обеспечена любым делящимся нуклидом или их комбинацией.

43. *Уран-ториевый* - ЯР с ториевым топливным циклом, в котором в составе топлива используется воспроизводящий ^{232}Th , воспроизводимый ^{233}U , а начальная критическая масса может быть обеспечена любым из делящихся нуклидов или их комбинацией.

44. *Учебный* - ЯР, предназначенный для проведения лабораторных работ и практических занятий в целях изучения ядерных превращений и нейтронно-физических процессов.

45. *Шариковый* - ЯР, активная зона которого представляет собой засыпку свободно перемещающихся твэлов в виде шаров из ядерного топлива, покрытых материалом, замедляющим нейтроны.

46. *Экспериментальный* - ЯР (критическая сборка) для изучения различных физических величин, знание которых необходимо для проектирования и эксплуатации ЯР. Мощность таких ЯР не превышает нескольких кВт.

47. *Энергетический* - ЯР, главным назначением которого является выработка энергии, используемой для получения электричества, для теплофикации, опреснения морской воды, в силовых установках на кораблях и т. п.

