

В.И. Солонин

**Конструирование Ядерных
Реакторов**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
В11

В11 **В.И. Солонин**
Конструирование Ядерных Реакторов / В.И. Солонин – М.: Книга по Требо-
ванию, 2021. – 399 с.

ISBN 978-5-458-34220-9

Конструкции различных типов реакторов, элементов активных зон, сред-
ства контроля за работой реакторов. Расчётное обоснование конструкций.
Теплофизика и гидродинамика ядерного реактора. Тепловые, гидравлические
и прочностные расчёты. Книга входит в серию учебных пособий "Ядерные
реакторы и энергетические установки" под общей ред. акад. Н. А. Доллежалея.

ISBN 978-5-458-34220-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

не приводятся, так как это перегрузило бы книгу. Следует иметь при этом в виду, что все современные расчеты при конструировании реакторов выполняются с помощью ЭВМ, причем все чаще в режиме диалога, когда специалист в ходе расчета имеет возможность уточнить программу и исходные данные и получать сразу оптимальные результаты. Обучение постановке задач для расчетов на ЭВМ, программированию и работе с ЭВМ осуществляется в специальных курсах. Пройдя такую подготовку и научившись разбираться в процессах, протекающих в реакторах, студенты, став специалистами, с успехом смогут использовать ЭВМ в своей инженерной деятельности.

Предлагаемая книга может быть полезной и работникам НИИ и КБ, разрабатывающим ядерные реакторы, а также специалистам, занятым их эксплуатацией.

При окончательной подготовке книги к печати были учтены замечания рецензентов: кафедры «Теплофизика ядерных реакторов» МИФИ и д-ра техн. наук С. П. Казновского, которым авторы выражают свою благодарность.

Авторы понимают, что книга может быть совершеннее, чем она есть, и с благодарностью примут предложения по ее улучшению.

ВВЕДЕНИЕ

Огромная энергия, заключенная в ядрах атомов, может быть высвобождена при осуществлении двух процессов — делении ядер тяжелых элементов и синтезе ядер легких элементов. Устройство, в котором осуществляется контролируемая самоподдерживающаяся цепная реакция деления ядер тяжелых элементов ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , называется ядерным реактором. Одна из основных характеристик реактора — его мощность, которая определяется числом делений в единицу времени. Мощность 1 Вт соответствует $3,2 \cdot 10^{10}$ дел./с. В 1 кг ^{235}U содержится $6,0228 \cdot 10^{23} / 0,235 = 2,563 \cdot 10^{24}$ ядер, поэтому при полном делении 1 кг ^{235}U высвобождается энергия, равная $8 \cdot 10^{13}$ Дж. Примерно такая же энергия выделяется при делении ^{233}U и ^{239}Pu . Деление ядер происходит в результате поглощения ими нейтронов. Число делений в единице объема реактора пропорционально произведению числа ядер делящихся нуклидов в этом объеме на плотность потока нейтронов, вызывающих деление. Поэтому объемная мощность зависит от концентрации делящихся нуклидов в единице объема и плотности потока нейтронов.

В состав собственно ядерного реактора в общем случае входят: ядерное топливо, замедлитель и отражатель нейтронов, теплоноситель (охладитель), регулирующие органы, детекторы контроля, внутриреакторные конструкции (технологические каналы, защитные экраны, опорные решетки и др.), корпус, приводы регулирующих органов, биологическая защита. Центральная часть ядерного реактора, включая топливо, замедлитель, регулирующие органы, часть детекторов контроля, образует активную зону, через которую прокачивается теплоноситель. Активная зона размещена в корпусе реактора. В случае интегральной компоновки здесь же устанавливаются главные циркуляционные насосы (ГЦН), парогенераторы или теплообменники, перегрузочные механизмы и т. п. Подобные решения позволяют уменьшить габариты реакторной установки, сократить число ответственных трубопроводов, что является выгодным, а порой и необходимым.

По способу размещения топлива различают *гетерогенные* и *гомогенные* реакторы. В первом случае ядерное топливо в виде отдельных элементов, изготовленных из сплавов, соединений или смесей, расположено в определенном порядке по всему объему активной зоны. Эти элементы называются *тепловыделяющими элементами (ТВЭлами)* и имеют различные форму и размеры. Практиче-

ское значение в настоящее время имеют именно такие реакторы.

В гомогенных реакторах топливо с замедлителем и теплоносителем представляет однородную (гомогенную) смесь в виде растворов, расплавов и т. п., равномерно распределенную по объему активной зоны и циркулирующую по контуру реакторной установки. Такие реакторы обладают рядом преимуществ, но их внедрение в народное хозяйство связано с необходимостью решения многих сложных проблем. В настоящее время практического значения они не имеют.

Нейтроны в активной зоне реактора образуются при делении ядер нуклидов. Для создания более благоприятных условий протекания цепной реакции деления образующиеся нейтроны с высокой энергией (0,5—10 МэВ) в реакторах на тепловых нейтронах замедляются до тепловых энергий (менее 1 эВ) с помощью замедлителя, состоящего из веществ с малой атомной массой. В реакторах на быстрых нейтронах, или быстрых реакторах, в которых для деления используются нейтроны деления большой энергии, замедлитель отсутствует. Активная зона окружена отражателем, предназначенным 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, которые при взаимодействии их с нейтронами образуют делящиеся нуклиды. Таковыми воспроизводящими нуклидами служат ^{232}Th или ^{238}U .

Практически во всех современных реакторах отвод тепла из активной зоны осуществляется путем нагрева циркулирующего через активную зону теплоносителя, которым могут быть различные жидкости (в том числе жидкие металлы) и газы.

Управление процессом деления осуществляется путем изменения реактивности с помощью регулирующих органов, перемещающихся в активной зоне. Их изготавливают из материалов, хорошо поглощающих нейтроны. Регулирующие органы подразделяются на три вида — компенсирования избыточной реактивности, автоматического поддержания заданной мощности (автоматического регулирования) и быстрого прекращения процесса (аварийной защиты). Первые обеспечивают компенсацию избыточной реактивности, которая закладывается в исходном состоянии, вторые поддерживают мощность реактора на заданном уровне при различных флюктуациях процесса. Третьи обеспечивают прекращение процесса деления при превышении соответствующих параметров допустимых пределов.

Для контроля за работой реактора в активную зону или около нее помещают детекторы, измеряющие параметры процесса. По этим измерениям судят о режиме работы реактора и ведется управление его работой. Детекторы подразделяют на внутриреакторные и вне реакторные.

Элементы активной зоны устанавливаются и фиксируются на внутриреакторных конструкциях, к которым относятся опорные

конструкции, защитные экраны, а также каналы для организации движения теплоносителя внутри реактора и др.

Корпус реактора является элементом конструкции, внутри которого размещены активная зона и все внутриреакторные устройства. При этом корпус может быть нагружен или не нагружен давлением теплоносителя, что зависит от типа реактора. Обычно вне корпуса или непосредственно на нем, или вблизи устанавливаются приводы регулирующих органов. Типы приводов бывают различными. Это или электропривод, или гидропривод, или пневмопривод.

Для обеспечения радиационной безопасности обслуживающего персонала в помещениях вокруг реактора предусмотрена биологическая защита, выполняемая из материалов, хорошо поглощающих все виды излучения.

Ядерным реакторам независимо от их типа присущи следующие специфические особенности.

1. Ядерное топливо — источник энергии в реакторе отличается очень высокой энергоемкостью. Напомним, что при полном делении 1 кг ^{235}U высвобождается энергия, равная $8 \cdot 10^{13}$ Дж, в то время как при сгорании 1 кг органического топлива выделяется энергия порядка $(3-5) \cdot 10^7$ Дж в зависимости от вида топлива. В этом заключается одно из главных преимуществ ядерного топлива и, как следствие этого, всей ядерной энергетики, поскольку благодаря большой энергоемкости ядерного топлива стало возможным создание на АЭС энергоблоков единичной мощностью 1 млн. кВт и более (проектируются блоки мощностью более 2 млн. кВт). При этом резко сокращаются железнодорожные перевозки топлива, а главное, экономятся такие ценные виды топлива, как нефть и природный газ.

Большая энергоемкость ядерного топлива позволила создать для морских судов различного назначения энергетические установки, обеспечивающие значительное увеличение дальности и длительности плавания без пополнения запасов топлива. Широкие возможности при использовании ядерного топлива открываются и в космической энергетике. Целый ряд задач в этой области техники может быть решен только при использовании в качестве источников энергии ядерных реакторов. Из-за большой энергоемкости ядерного реактора необходимо считать его потенциальным источником повышенной опасности и предусмотреть соответствующие меры, исключающие возможность неконтрольного выделения энергии.

2. Способ «сжигания» топлива в ядерном реакторе отличается от способа сжигания органического топлива. В последнем случае осуществляется постоянная подача необходимого количества топлива в зону горения, где, соединяясь с окислителем при определенной температуре, оно сгорает, т. е. расходуется с выделением энергии, а несгоревшие остатки, примеси и продукты сгорания (дымовые газы) удаляются в окружающее пространство, при этом некоторая часть выделившейся тепловой энергии теряется безвозвратно

с горячими дымовыми газами, которые к тому же загрязняют окружающую среду.

В ядерный реактор топливо загружается порциями. После его выгорания до возможного предела оставшееся топливо вместе с накопившимися продуктами деления и другими, нетопливными материалами, входящими в состав твэлов, выгружается из реактора. Время, в течение которого ядерное топливо находится в реакторе, может составлять несколько лет. Оно определяется как календарный срок работы. Время работы топлива в пересчете на полную мощность реактора называется *кампанией топлива*. Выгоревшее топливо может выгружаться из реактора полностью или частично. При частичной перегрузке в зависимости от типа реактора выбирается доля перегружаемого топлива и, следовательно, интервал времени между перегрузками. Таким образом, запас топлива на выгорание в различных реакторах бывает разный. Но в любом случае наличие этого запаса требует соответствующей компенсации, которая обеспечивается размещением в активной зоне требуемого количества поглощающих нейтроны материалов, выводимых из активной зоны по мере выгорания топлива. При таком способе «сжигания» топлива физические характеристики реактора постоянно изменяются, что также составляет существенную особенность работы ядерных реакторов.

3. Для работы ядерного реактора не требуется окислитель. Эта особенность имеет важное значение при использовании ядерных энергетических установок в качестве двигателей подводных судов и космических объектов. Отсутствие же дымовых газов уменьшает потери тепловой энергии, что повышает возможный термодинамический КПД установок и исключает загрязнение окружающей среды продуктами сгорания, несгоревшими остатками топлива и различными вредными примесями.

4. Ядерные реакторы характеризуются очень высокой теплонапряженностью активной зоны. Это определяется высокой концентрацией энергии в ядерном топливе и большим количеством энергии, выделяющейся при каждом акте деления ядер. Тепловые потоки на теплоотдающих поверхностях в реакторах составляют $\sim 10^6$ Вт/м², а объемное тепловыделение в топливе $\sim 10^9$ Вт/м³. Для сравнения отметим, что значения аналогичных характеристик в любых других источниках тепла на несколько порядков меньше.

Из-за высоких тепловыделений и тепловых потоков в конструкциях внутри реактора возникают большие температурные перепады, которые к тому же могут претерпевать многочисленные и значительные колебания при изменениях режимов работы.

Тепловыделение в реакторе неравномерно по объему активной зоны. Это требует принятия определенных мер для обеспечения соответствия между тепловыделением и теплосъемом. В противном случае могут возникнуть значительные неравномерности в распределении температур в конструкции.

5. Особенностью теплофизики ядерных реакторов является наличие тепловыделений не только в ядерном топливе, но и в конст-

рукционных материалах. Доля этого тепла в общем тепловыделении составляет несколько процентов. При тех больших количествах тепла, которое выделяется в реакторах, тепловыделение в конструкционных материалах весьма значительно и необходимо обеспечить его отвод из реактора либо с помощью основного теплоносителя, либо специальной системой.

6. После остановки ядерного реактора (прекращения процесса деления) в отличие от источников тепла на органическом топливе в активной зоне продолжает генерироваться тепловая энергия. Эта остаточная энергия выделяется вследствие радиационных процессов, в результате которых образовавшиеся при делении нестабильные радиоактивные осколки превращаются в стабильные продукты деления.

Отвод *остаточного тепловыделения* требуется обеспечивать в течение длительного времени либо штатной системой циркуляции теплоносителя, либо с помощью специальной системы отвода остаточного тепловыделения.

7. Протекающие в реакторе процессы сопровождаются излучением, оказывающим определенное воздействие на материалы, из которых изготовлены узлы реактора, а также на обслуживающий персонал. В результате материалы упрочняются, снижается их пластичность, при этом уменьшается их теплопроводность и иногда увеличивается скорость ползучести. Чтобы обезопасить персонал, обслуживающий реакторные установки, от вредного воздействия облучения, предусматриваются специальные меры — биологическая защита, вентиляция и др., благодаря которым обеспечиваются нормальные условия для работающих и окружающего населения.

Работа ядерного реактора сопряжена с очень важной проблемой удаления и захоронения радиоактивных отходов. Отработавшие твэлы, утечки активного теплоносителя, загрязненные жидкости, использованные для отмывки различных узлов реакторной установки, требуются соответствующим образом обработать, поместить в специальные емкости и захоронить таким образом, чтобы исключить всякую возможность их распространения.

Важную задачу представляет организация хранения и транспортировка отработавшего ядерного топлива, его переработка. Однако эти вопросы относятся уже к внешнему топливному циклу и в настоящей книге не рассматриваются.

К конструкции реакторов предъявляются чрезвычайно высокие требования, которые условно можно разделить на три группы. К одной относятся требования, вызываемые специфическими особенностями ядерных реакторов; к другой — требования, определяемые назначением реактора, и, наконец, к третьей группе — общетехнические требования, однако более жесткие по сравнению с требованиями к неядерным источникам энергии, что определяется опять же особенностями работы реакторов. Такое деление в значительной степени условно, так как к ядерным реакторам предъявляются требования в комплексе; они, как правило, взаимосвя-

ны и часто противоречивы. Тем не менее для анализа это деление целесообразно, поскольку позволяет более четко рассмотреть роль и значение каждого из требований. Приведем основные специфические требования:

1. Для обеспечения как можно более полного полезного использования времени работы реакторов, а также для получения лучших экономических показателей необходимо стремиться к большей кампании и календарному сроку работы топлива, т. е. к большему времени пребывания топлива в реакторе. Это относится как к реакторам, перегружаемым полностью или частично через более или менее продолжительные промежутки времени и при остановке реактора, так и к реакторам, перегружаемым «непрерывно», т. е. постоянно, с равными небольшими промежутками времени и без остановки реактора.

2. Для обеспечения требуемой длительности кампании необходимо иметь достаточную загрузку реактора ядерным топливом. Этого можно достичь за счет обогащения топлива делящимися нуклидами.

3. Возможность создания достаточно большой загрузки топлива в реакторе определяется также способностью регулирующих органов компенсировать возникающую при этом избыточную реактивность, максимальную в начале кампании. При этом, чем больше интервал между перегрузками топлива, тем большую избыточную реактивность требуется скомпенсировать. Поэтому необходимо обеспечить соответствующий «вес» регулирующих органов в реакторе, а следовательно, их число и размеры. Эта проблема решается гораздо проще в реакторах с непрерывной перегрузкой, в которых требуется меньший запас избыточной реактивности, поскольку в активную зону постоянно добавляется свежее топливо небольшими порциями.

Требуемое количество регулирующих органов определяется также необходимостью обеспечения автоматического регулирования мощности реактора, т. е. поддержания ее на заданном уровне с заданной степенью точности, обеспечения возможности быстрой (аварийной) остановки процесса деления в случаях превышения некоторыми параметрами допустимых пределов, а также для выравнивания поля энерговыделения.

Таким образом, одно из главных требований, которое требуется удовлетворить при конструировании реакторов, — обеспечение в активной зоне необходимого количества регулирующих органов.

4. Большое значение для нормальной безаварийной работы реактора имеет знание, выбор и правильный учет динамики изменения его нейтронно-физических характеристик в различных стационарных и переходных режимах работы. Вследствие изменения реактивности в отдельных случаях реактор может выйти из-под контроля. Чтобы этого не происходило, стремятся так сконструировать активную зону, чтобы полный мощностной эффект реактивности был мал и имел отрицательный знак, т. е. чтобы при увеличении мощности формировалась отрицательная реактивность.

5. При конструировании ядерных реакторов стремятся обеспечить как можно большую равномерность тепловыделения по объему активной зоны. Однако неравномерность тепловыделения органически присуща активной зоне ядерного реактора, поскольку тепловыделение пропорционально потоку нейтронов, а последний спадает к периферии активной зоны вследствие утечек нейтронов. Кроме того, распределение тепловыделения изменяется во времени из-за неравномерного выгорания ядерного топлива. Увеличивают неравномерность тепловыделения регулирующие органы, перемещающиеся в активной зоне, а также изменения плотности и температуры замедлителя и теплоносителя, температуры топлива и т. д. Правильный учет всех факторов имеет большое значение и позволяет конструировать реакторы и выбирать режимы работы и перегрузок топлива, добиваясь минимально возможной неравномерности тепловыделения по объему активной зоны в течение всей кампании реактора.

6. Из-за неравномерности тепловыделения по радиусу реактора необходимо распределять теплоноситель по каналам, расположенным на различных расстояниях от центра, пропорционально тепловыделению в этих каналах, т. е. *профилировать расход теплоносителя*. Без этого подогрев теплоносителя в каналах с различным тепловыделением был бы неодинаков, и его температура на выходе из каналов была бы разной. Такой режим работы элементов активной зоны нецелесообразен, так как большинство из них находилось бы в условиях работы с запасами, значительно превышающими требуемые, средняя температура на выходе из реактора была бы ниже возможной и, как следствие всего этого, снизилась бы экономичность конструкции.

7. При разработке конструкции реактора необходимо обеспечить возможность отвода остаточных тепловыделений. Иначе после остановки реактора температура элементов активной зоны вследствие продолжающейся генерации тепла непрерывно росла бы, что в конце концов привело бы к ее перегреву выше допустимого уровня и к разрушению. При разрушении же активной зоны, полном или частичном, может произойти выброс радиоактивных веществ за пределы реактора и установки в целом, что недопустимо.

8. Из-за продолжения тепловыделений в активной зоне после прекращения реакции деления необходимо обеспечить также охлаждение активной зоны в случаях различных нарушений нормального протекания технологического процесса работы реактора, которые могут произойти при отказах оборудования или разрывах трубопроводов реакторной установки. Если не предусмотреть такого аварийного охлаждения, то активная зона может разрушиться с недопустимыми последствиями, как и при отсутствии отвода остаточных тепловыделений в случае нормальной остановки.

9. Для надежной работы всех узлов реактора в течение запланированного срока очень важен правильный выбор материалов с учетом изменения их свойств под действием облучения. Материалы должны сохранять пластичность и теплопроводность не ниже

допустимых пределов, деформация узлов и отдельных деталей не должна превышать заданных ограничений.

10. При конструировании реакторов необходимо обеспечить требуемую защиту обслуживающего персонала и населения, а также окружающей среды от вредного воздействия излучения реактора и образующихся в результате его работы твердых, жидких и газообразных радиоактивных продуктов. С этой целью предусматриваются биологическая защита, различные фильтры, системы очистки, газгольдеры выдержки и т. п.

11. Основное, определяющее требование при создании любого ядерного реактора, — обеспечить ядерную и радиационную безопасность, т. е. при любых эксплуатационных и любых аварийных ситуациях должно быть исключено неконтролируемое развитие цепной реакции деления как реактора в целом, так и в отдельных частях активной зоны, а также облучение персонала и заражение окружающей местности выше установленных норм.

В зависимости от назначения ядерных реакторов определяющими могут быть разные требования. Так, реакторы АЭС должны быть надежны и экономичны. Необходимо добиваться минимально возможных удельных капиталовложений на единицу установленной мощности и минимальной себестоимости вырабатываемой электроэнергии. Важным фактором является топливная составляющая себестоимости, т. е. затраты на ядерное топливо, отнесенные к выработанной электроэнергии, а также годовые расходы природного урана. Необходимо также добиваться минимальных удельных показателей в расходе металла и других материалов, в строительных объемах и т. п. В большей степени все эти экономические характеристики зависят от КПД энергоблока, т. е. от параметров теплоносителя. Поэтому следует стремиться к получению высокой температуры теплоносителя на выходе реактора, учитывая, однако, что выполнение этого требования может привести к увеличению паразитного поглощения нейтронов в активной зоне за счет увеличения количества материалов и их жаростойкости.

В последнее время все более актуальным становится требование работы при значительных изменениях во времени нагрузок, остановках на выходные и праздничные дни и ночные часы, т. е. требование работы в переменном режиме, или, как говорят, по диспетчерскому графику.

Основное требование, предъявляемое к судовым реакторам и реакторам космических установок, — это компактность и минимальные массо-габаритные характеристики. Стоимость этих установок также должна учитываться, однако для этих реакторов она не является определяющим фактором. При конструировании судовых реакторов важно обеспечить возможность работы при большом числе пусков и остановок, переходов с режима на режим, т. е. в условиях переменных нагрузок, а также высокую удельную энергонапряженность. Последнее требование особенно жестко удовлетворяется в космических реакторах, причем температура теплоносителя в них может достигать нескольких тысяч градусов.

В исследовательских реакторах различного назначения необходимо стремиться к получению максимальных потоков нейтронов при минимально возможной тепловой мощности, т. е. к получению максимального отношения потока к мощности. В большинстве случаев такие наиболее напряженные условия удается создать в части активной зоны, в так называемых «ловушках» нейтронов, где и устанавливаются объекты испытаний.

К ядерным реакторам предъявляются также обычные общетехнические требования, а именно: надежность конструкции, сохранение работоспособности при различных внешних воздействиях (землетрясения и т. п.), безопасность работы, технологичность в изготовлении и монтаже, ремонтпригодность, минимальное обслуживание, автоматизация управления и т. п. Эти требования должны выполняться жестко. Часто требования, предъявляемые к ядерным реакторам, противоречат друг другу, и приходится находить компромиссные решения, чтобы создать наилучшую конструкцию.