

жесткости, так что приведенные в табл. 6 данные характеризуют пределы, в которых могут изменяться эти отношения сечений в быстрых окисных реакторах с натриевым теплоносителем. Средние сечения радиационного захвата отнесены к средним сечениям деления ^{235}U в активной зоне. Для зоны воспроизводства «большого» реактора приведены данные без учета (*a*) и с учетом (*b*) изменения уровня нейтронного потока по сравнению с активной зоной. Многогрупповые сечения, использованные при усреднении, соответствуют системе констант БНАБ-70 [5,6]. Данные по сечениям радиационного захвата для ^{230}Th не опубликованы.

Сопоставим данные табл. 6 и 3 и учтем зависимость γ от типа реактора (см. табл. 4) и вероятность образования ^{232}U (см. табл. 2). Тогда окажется, что если не учитывать различий эффективного сечения реакции (*n*, *2n*) для реакторов разного типа, то вероятность образования ^{232}U в быстрых реакторах по рассмотренным цепочкам примерно такая же, как в энергетических реакторах типа ВВЭР с обогащением 3,6 % (при этом предполагается, что глубина выгорания одинаковая).

Выводы. В результате расчетов установлено, что для ядерных реакторов энергетического типа коли-

чество образующегося ^{232}U существенно зависит от жесткости спектра нейтронов, а для быстрых реакторов, работающих на урановом топливе, это количество близко к количеству ^{232}U , получаемому в реакторах типа ВВЭР при обогащении 3,6 %. Сопоставление делается при одной глубине выгорания ^{235}U , различие эффективных сечений реакции (*n*, *2n*) не учитывается.

Для определения абсолютного количества накопления ^{232}U учитывать реакцию (*n*, *2n*) необходимо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-76. М., Атомиздат, 1978.
2. Галанин А. Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1959.
3. Круглов А. К., Рудик А. П. Искусственные изотопы и методика расчета их образования в ядерных реакторах. М., Атомиздат, 1977.
4. Алексеев П. Н., Зарицкий С. М., Ковалевич О. М. В кн.: Физика ядерных реакторов. Вып. 6. М., Атомиздат, 1978, с. 45.
5. Абагян Л. П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
6. Абагян Л. П., Мурогов В. М. В кн.: Бюллетень Информационного центра по ядерным данным. № 5. М., Атомиздат, 1968, с. 253.

Поступила в Редакцию 28.05.79

УДК 621.039.5.58

О структурной надежности АЭС

КЛЕММАН А. И., ПОЛЯКОВ Е. Ф.

В 1978 г. была завершена разработка первого отраслевого руководящего технического материала (РТМ) «Методика расчета структурной надежности АЭС и ее систем на этапе проектирования». Настоящая статья содержит информацию об основных особенностях и возможностях РТМ.

Общие положения. Этот материал предназначен для расчета на этапе проектирования показателей структурной надежности блока АЭС, его частей и отдельных систем, включая системы безопасности. Под структурной надежностью понимается надежность структурной схемы блока АЭС, его частей или системы при заданных показателях надежности составляющих элементов, известных функциональных связях между ними и принятой стратегии планово-предупредительных ремонтов. В РТМ приведены рекомендации по расчету надежности таких специфических систем, как система управления и защиты реактора (СУЗ), система контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), а также систем безопасности.

РТМ предназначен для АЭС со следующими основными признаками:

сохранение полной работоспособности при отка-

зах отдельного оборудования вследствие его резервирования;

возможность работы при отказах некоторых единиц оборудования на уровнях мощности, меньших номинальной $N_{н}$;

наличие блоков однотипных элементов, представляющих собой структуры типа «*m* из *n*»; использование АЭС на разных уровнях мощности (это особенно касается АЭС, работающих по переменному графику нагрузки);

проведение в процессе эксплуатации регулярных планово-предупредительных ремонтов;

возможность работы в базовом режиме или по переменному графику нагрузки.

В основу РТМ положены аналитические методы современной теории надежности с использованием методологии минимальных сечений сложных систем [1, 2]. Расчеты по методике РТМ позволяют количественно оценить уровень структурной надежности, выявить слабые места, выбрать надлежащее резервирование оборудования, распределить требования к надежности АЭС по составляющим элементам с помощью вариантов расчетов (в частности, для определения требований к на-

дежности комплектующего оборудования), провести сравнительные оценки надежности различных вариантов структурного выполнения АЭС и т. д.

Для учета внутренних и внешних факторов, воздействующих на величину мощности АЭС, при анализе надежности вводятся понятия располагаемой $N_p(t)$ и требуемой $N_T(t)$ мощности. Располагаемая мощность — это то наибольшее значение мощности, обусловленное совокупностью состояний всех элементов оборудования, которое может обеспечить АЭС в рассматриваемый момент времени. Требуемая мощность — необходимое в данный момент времени значение мощности, определяемое потребностями внешней по отношению к АЭС системы.

В РТМ для АЭС как сложной системы, имеющей более чем два возможных состояния, вводится понятие работоспособного $N_p(t) \geq N_s$ и неработоспособного $N_p(t) < N_s$ состояний по отношению к конкретному уровню мощности. В качестве конкретного набора дискретных уровней мощности рассматриваются номинальный уровень мощности N_n , минимальный уровень $N_m \neq 0$, ниже которого АЭС не эксплуатируется, а также ряд промежуточных уровней, лежащих в интервале $[N_m, N_n]$, в котором АЭС либо может работать в случае отказа отдельного оборудования, или же должна работать в соответствии с заданным графиком нагрузки $N_T(t)$.

При расчете надежности АЭС, работающих в базовом режиме $N_T(t) = N_n$, различаются полные и частичные отказы по отношению к фиксированному уровню мощности. При расчете надежности АЭС, работающих по переменному графику нагрузки, рассматриваются отказы по отношению к фиксированному уровню мощности N_s и отказы, вызванные превышением требуемой мощностью располагаемой, $N_T > N_p$.

Для расчета показателей надежности любой технической системы необходимо сформулировать условия неработоспособности (или работоспособности). В РТМ условия неработоспособности АЭС формулируются отдельно для каждого фиксированного уровня мощности N_s в форме матрицы критических состояний АЭС. При этом необходимо определить для каждого из возможных состояний установки значение располагаемой мощности от состояния ее элементов и выделить неработоспособные состояния, т. е. состояния, для которых располагаемая мощность меньше рассматриваемого уровня, а также отобрать из множества неработоспособных состояний критические состояния, т. е. те, которые реализуются при минимальном количестве отказавших блоков и элементов в них. В случае неблочной структуры* установки для

получения полного набора критических состояний нужно построить соответствующую логическую схему — «дерево отказов» — и на основе ее анализа выделить все минимальные наборы отказавших элементов — критические группы элементов (КГЭ), при которых и происходят отказы установки. В этом случае число строк матрицы соответствует числу КГЭ. Число элементов в каждой строке матрицы равно числу элементов установки. Элементы, входящие в КГЭ, обозначаются 1, остальные элементы — 0.

Для блочной структуры установки условия неработоспособности удобнее записать, используя понятие критической группы состояний блоков (КГСБ). Это понятие предполагает такой набор состояний минимально возможного числа блоков однотипных элементов (с минимальным количеством отказавших элементов, обуславливающих состояние блока), который соответствует неработоспособному состоянию АЭС по отношению к фиксированному уровню мощности. В этом случае число столбцов матрицы неработоспособности равно числу блоков, а число строк — полному набору КГСБ. В каждой строке матрицы элементы, отличные от нуля, обозначают число отказавших элементов в блоках, входящих в конкретную КГСБ.

В свою очередь, для выделения КГСБ и КГЭ необходимо знать зависимость между располагаемой мощностью и состоянием элементов, которая задается с помощью так называемых функций состояний. Функция состояния блока $f_j(x_j)$ представляет собой вклад j -го блока (в долях единицы от номинальной мощности АЭС) в зависимости от числа отказавших в нем элементов при полностью исправных остальных блоках. Наиболее общий вид задания функции состояния — табличный. Для удобства анализа в соответствии с функциональным назначением и структурой АЭС блоки однотипных элементов, представляющие собой структуры типа « m из n » объединяются в комплексы (парогенерирующая петля, паротурбинный комплекс и т. п.).

Функция состояния каждого комплекса выражается через функции состояния входящих в него блоков. Эта зависимость не может быть записана в общем аналитическом виде и задается с учетом данных в РТМ рекомендаций, например для комплексов, состоящих из последовательно соединенных \bar{n} блоков,

$$\varphi_k(f_1^{(k)}, \dots, f_j^{(k)}, \dots, f_{\bar{n}}^{(k)}) = \min \{f_1^{(k)}, \dots, f_j^{(k)}, \dots, f_{\bar{n}}^{(k)}\};$$

для комплексов, содержащих только параллельно включенные блоки,

$$\psi_k(f_1^{(k)}, \dots, f_j^{(k)}) = \sum_{j=1}^{\bar{n}} f_j^{(k)}.$$

* Если в установке отсутствуют блоки однотипных элементов, образующие системы типа « m из n ».

После задания функций состояний блоков и комплексов для АЭС задается функция ее состояния, представляющая собой зависимость располагаемой мощности АЭС (в долях единицы от номинала) от состояния комплексов

$$N_D(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_M).$$

Для расчета показателей надежности АЭС необходимы следующие данные:

а) по условиям неработоспособности задаются полные наборы КГЭ или КГСБ;

б) данные по надежности элементов могут быть представлены двояко: путем задания законов (плотности) распределения времени безотказной работы $f(t)$ и времени восстановления элемента $g(t)$ или путем задания коэффициента готовности $k_r(t)$ и параметра потока отказов $\omega(t)$ элемента. Второй способ предпочтителен, если в качестве элемента рассматривается некоторая подсистема со сложной структурой, например СУЗ, КИПиА, отказы которой приводят к изменению располагаемой мощности. Рекомендации по расчету показателей для этих систем приведены в специальных разделах РТМ;

в) в качестве исходных данных по плановым ремонтам АЭС и ее оборудования задаются интервалы времени между текущими и капитальными ремонтами АЭС и оборудования, среднее время, затрачиваемое на текущий и капитальный ремонт элемента, данные о составе ремонтных бригад;

г) в РТМ рассматриваются два возможных способа задания режима требуемой мощности: вероятностный и детерминированный. Первый характеризуется средним временем поддержания мощности на конкретном уровне и матрицей переходов с уровня на уровень. Во втором способе изменение требуемой мощности задается детерминированным графиком в координатах мощность — время.

Номенклатура рассчитываемых показателей надежности. РТМ позволяет рассчитывать широкий комплекс показателей надежности, отражающих по отдельности или в совокупности свойства безотказности и ремонтпригодности АЭС. Для АЭС, работающих в базовом режиме, выделяются две группы показателей надежности: показатели по отношению к отдельным фиксированным уровням мощности и «интегральные» показатели, характеризующие надежность АЭС по отношению ко всем уровням мощности. К первой группе относятся коэффициент готовности $k_r(N_s, t)$ и средний коэффициент готовности $k_r(N_s)$; параметр потока отказов $\omega(N_s, t)$ и средний параметр $\omega(N_s)$ в рассматриваемом интервале; вероятность безотказной работы по отношению к рассматриваемому уровню $R(N_s, t)$; наработка АЭС на отказ по отношению к рассматриваемому уровню $T(N_s)$. Во вторую группу входят следующие показатели: средняя располагаемая мощность $\bar{N}_D(t)$ и средняя

располагаемая энерговыработка за некоторый период времени $E(t)$; средняя суммарная продолжительность ремонтов за некоторый период $[0, t]$ эксплуатации; коэффициент технического использования АЭС $R_{т.и}$ (отношение среднего времени работы АЭС на мощности к сумме этого времени и средней продолжительности плановых и неплановых ремонтов за это же время); коэффициент использования установленной мощности и др.

Для АЭС, работающих по переменному графику нагрузки, дополнительно рассматриваются показатели, характеризующие надежность с учетом заданного режима изменения мощности, т. е. учитывающие отказы, связанные со снижением располагаемой мощности ниже требуемой или повышением требуемой выше располагаемой. Условно будем называть отказы этого типа режимными. В РТМ рассчитываются такие показатели надежности по отношению к режимным отказам: коэффициент готовности и средний коэффициент готовности, параметр потока отказов и средний параметр потока отказов ω_p , вероятность безотказной работы, дефицит мощности, средняя ожидаемая энерговыработка АЭС за время t , коэффициент обеспечения требуемой энерговыработки и др.

В отдельной главе РТМ изложена методика расчета показателей АЭС, работающей в базовом режиме, при описании ее функционирования марковским процессом. Это справедливо в тех случаях, если элементы не восстанавливаются в указанном интервале (при этом законы распределения времени до отказа элементов могут быть произвольными) и если законы распределения времени до отказа и времени восстановления в рассматриваемом интервале экспоненциальные.

В остальных случаях марковскую модель целесообразно использовать для проведения предварительных расчетов надежности АЭС либо ее отдельных систем, когда число работоспособных и неработоспособных состояний, связанных с восстанавливаемыми и невосстанавливаемыми элементами не более 50 в каждом случае соответственно (при этом время расчета на ЭВМ БЭСМ-6, как правило, не превышает 30 мин).

Расчет показателей надежности с использованием теории марковских процессов проводится в следующей последовательности: строится граф состояний АЭС (либо отдельной рассматриваемой системы), записываются и решаются системы дифференциальных уравнений для вероятностей реализации всех состояний, полученных по графу, вычисляются показатели надежности.

В заключительных трех главах РТМ даны методики надежности отдельных систем АЭС. В частности, в гл. 7 изложена методика расчета показателей надежности выполнения СУЗ следующих функций: поддержания мощности реактора на заданном уровне, перевода реактора с одного уровня на другой, аварийной защиты.

В гл. 8 изложена методика оценки показателей надежности систем КИПиА с учетом функций контроля и регистрации основных технологических параметров, сигнализации об их отклонении за допустимые пределы, защиты и регулирования важнейших параметров технологического процесса.

В гл. 9 изложены методические вопросы расчета показателей систем безопасности с учетом длительности выполнения заданных функций для различных условий и регламента проведения технического обслуживания при работе реактора на мощности.

В приложениях РТМ приведены краткие данные о надежности оборудования АЭС, методика оценки надежности трубопроводов, пояснения к по-

строению «дерева отказов» и некоторые другие справочные материалы.

Для облегчения расчетов по методике РТМ созданы специальные программы для ЭВМ БЭСМ-6. Полные наборы КГСБ и КГЭ для нескольких типичных структурных схем АЭС определяются по программе ФОРОНС. Программа РАСТР-1 реализует методику РТМ для задания условий работоспособности через КГЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. Пер. с англ. Под ред. Б. В. Гнеденко. М., «Сов. радио», 1969.
2. Vesely W. «Nucl. Engng Design», 1970, v. 13, N 2, p. 337.

Поступила в Редакцию 28.05.7

УДК 621.039.54:539.4

Оценка несущей способности циркониевых оболочек ТВЭЛОВ

СОЛЯНЫЙ В. И., ЯМНИКОВ В. С.

В энергетических реакторах с водяным теплоносителем, как правило, используются стержневые ТВЭЛы с оболочками из сплавов на основе циркония. Для проектирования таких ТВЭЛОВ, анализа эксплуатационной надежности, особенно при переходных режимах, и изучения последствий при возможных аварийных ситуациях необходимо знать предельные прочностные характеристики оболочек при сложнонапряженном состоянии в широком интервале температуры.

Анизотропность оболочек из сплавов на основе циркония вызвана, с одной стороны, деформационной анизотропией, возникшей в процессе изготовления, и, с другой — исходной анизотропией монокристалла α -циркония. Обычное экспериментальное определение предельных напряжений и деформаций анизотропных оболочек при сложнонапряженном состоянии, осуществляемое путем испытаний на разрушение внутренним давлением и осевым нагружением, требует сложного аппаратного оснащения и весьма трудоемко. Однако необходимые характеристики могут быть получены посредством теоретического рассмотрения несущей способности цилиндрической анизотропной оболочки ТВЭЛА на основе представлений о потере устойчивости пластического деформирования.

Поскольку экспериментальная проверка не подтвердила [1] возможности использования критерия Свифта, модифицированного для случая анизотропных материалов, был применен статический критерий [2], согласно которому потеря устойчивости пластического деформирования наступает при достижении максимума какой-либо внешней нагрузки и характеризуется равенством нулю бесконечно малых ее приращений.

Постановка задачи и ее решение. Рассмотрим процесс кратковременного деформирования весьма пластичной оболочки при простом нагружении и предположим, что справедлива теория пластической анизотропии Хилла [3], т. е. материал оболочки обладает пластической ортогональной анизотропией (ортотропией) и изотропным упрочнением. Следует отметить, что в трубах, идущих на изготовление ТВЭЛОВ, текстура такова, что нормаль к плоскости базиса лежит в плоскости поперечного сечения. Анизотропию таких оболочек можно охарактеризовать коэффициентами R_θ и R_z , определяемыми как отношение поперечных деформаций при одноосном растяжении стандартных образцов вдоль осей θ и Z соответственно, т. е.

$$R_\theta = \varepsilon_z / \varepsilon_r; \quad R_z = \varepsilon_\theta / r. \quad (1)$$

Основные соотношения теории пластичности ортотропного металла для плоского напряженно-деформированного состояния, когда главные оси тензора напряжений и тензора приращений деформаций совпадают, представим в следующем виде:

а) связь между напряжениями и деформациями

$$\varepsilon_\theta = \frac{\bar{\varepsilon}}{A\sigma} [(H + G) - Hm] \sigma_\theta; \quad (2a)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\bar{\varepsilon}}{A\sigma} [(H + F)m + H] \sigma_\theta; \quad (2б)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\bar{\varepsilon}}{A\sigma} [G + Fm] \sigma_\theta, \quad (2в)$$

где $m = \sigma_z / \sigma_\theta = \text{const}$ ($0 \leq m < \infty$); H, G, F — параметры анизотропии; $A = \frac{2}{3}(H + G + F)$;