

УДК 621.039.58

Мельников В.Н., Пепельшев Ю.Н. (ОИЯИ), Чистозвонов А.С. (Ростехнадзор)

Важной задачей при эксплуатации ядерных установок является прогнозирование возникновения нарушений. Получить количественную оценку вероятности возникновения нарушений, в том числе и проектных аварий, исходя из анализа работы ядерных установок, — задача сложная, противоречивая и недостаточно определенная.

Модель вероятностного подхода для анализа отказов в работе ИБР-2. Для статистического анализа были использованы все нарушения, начиная с 1984 и по 2005 г. (рис. 1). Данные нормированы на реальное время работы реактора в году. Для классификации нарушений в работе ИБР-2 принимали во внимание шкалы классификации по НП-027-01 [1] и INES [2]. На их основе условно выделим кратко следующие категории событий:

П0 — нарушения в работе, не имеющие значения для безопасности;

П1 — отключение электроснабжения без превышения пределов безопасной эксплуатации;

П2 — нарушения в работе оборудования без отклонения рабочих параметров;

П3 — ошибки персонала, без отклонений от нормальной эксплуатации;

П4 — нарушения в работе оборудования, отклонение от нормальной эксплуатации;

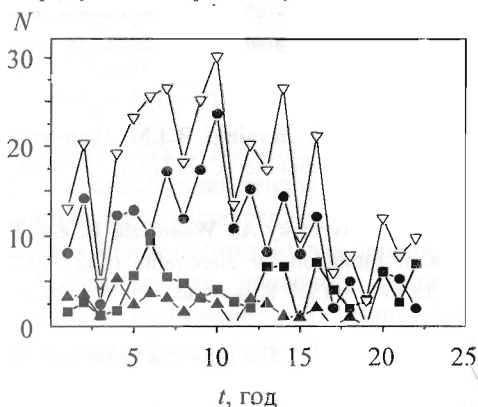
П5 — возникновение аварийной ситуации в результате нарушения в работе оборудования;

П6 — аварийные ситуации, связанные с повреждением важного для безопасности оборудования;

П7 — аварии, связанные с повреждением твэлов;

П8 — аварии, связанные с выходом радиоактивных продуктов в пределах установки;

П9 — аварии, связанные с выбросом радиоактивных продуктов за пределы установки.



Р и с. 1. Зависимость частоты появления категорий отказов П1 (■), П2 (●), П3 (▲) от времени работы ИБР-2; ▽ — все события

Отличие данной классификации от рекомендованной, например, в работе [1] незначительно: сделана поправка на конкретные особенности ИБР-2. Статистика нарушений в работе ИБР-2 охватывает категории от нулевой до четвертой. Относительная частота этих событий следующая: П0 — 0,00262, П1 — 0,249, П2 — 0,265, П3 — 0,115, П4 — 0,0314.

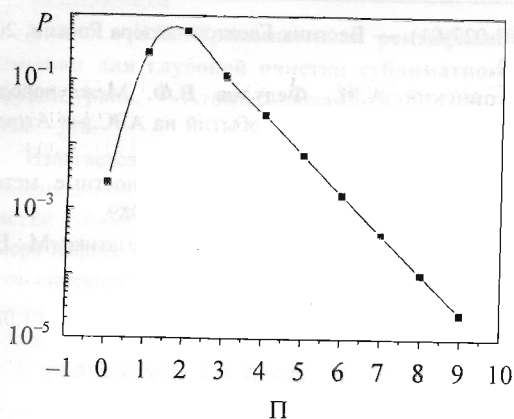
Из имеющегося фактического материала ничего нельзя сказать о возможности появления событий с категорией выше четвертой. Для применения вероятностного подхода к обработке данных введем дополнительное условие, которому должны удовлетворять категории событий: появление события с высоким номером носит случайный характер и описывается спадающей экспоненциальной функцией. Это условие можно обосновать исходя из общего положения, что события с тяжелыми последствиями равновероятны и редки. Обозначая средний интервал между поступившими событиями через ζ и плотность распределения вероятностей событий в виде $y(x)$, следуя [3], получим

$$y(x) = a \exp(-x/\zeta). \quad (1)$$

Постоянная a и величина ζ определяются из относительной частоты событий в точках П3 и П4. Аргумент x принимает дискретные целые значения и соответствует шкале событий П3—П9, т.е. предполагается, что асимптотическое поведение плотности вероятности событий в экспоненциальной форме (1) начинается с точки П5. Получаем

$$y(x) = 5,678 \exp(-1,299 x), x \geq 5. \quad (2)$$

Для равномерной шкалы следует, что асимптотическое изменение плотности вероятности событий имеет достаточно простую экспоненциальную форму. Для конкретной установки, имеющей свой набор оборудования, шкала событий может иметь отличия. Результаты расчетов по формуле (2) с учетом известных значений для событий П0—П4 после нормировки на единицу приведены на рис. 2. Среднее значение распределения плотности вероятности событий $\xi = 1,96$ совпадает с категорией П2, дисперсия $\sigma^2 = 0,63$. Округляя эти значения до ближайшего целого, видим, что аномальные события попадают с наибольшей вероятностью в интервал П1—П3. Выражение для вероятности события (2) можно распространить и на категорию П10. По изложенной классификации событий и в соответствии с международной шкалой INES событие П10 можно отнести к тяжелой аварии. Имеется общее требование к вероятности появления тяжелых аварий — их вероятность



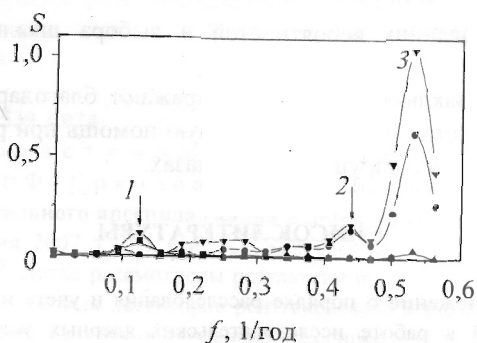
Р и с. 2. Плотность вероятности событий отказов ИБР-2 по категориям отказов

не должна превышать 10^{-6} в год. Для ИБР-2 такая авария относится к разряду гипотетических и поэтому в качестве возможной проектной аварии не рассматривается. Формальное вычисление для ИБР-2 вероятности события П10 по формуле (2) равно $1,28 \cdot 10^{-5}$ в год.

Приведем оценку сверху вероятности появления отказа категории П5 и выше. Вероятность того, что абсолютное отклонение случайной величины от ее центра распределения не превзойдет данное число n , определяется неравенством Чебышева [4]

$$P\{|x - \xi| \geq n\} \leq \sigma^2/n^2. \quad (3)$$

Для дисперсии 0,63 при $n = 3$ $P\{|x - \xi| \geq 3\} \leq 0,07$. Вероятность того, что очередное событие будет удалено на три единицы от категории П2, т.е. произойдет событие типа П5 или выше меньше или равно 0,07. В официальной статистике подобных отказов нет. Здесь нужно отметить, что вероятность отклонения случайной величины от среднего значения слабо зависит от диапазона ошибок в точках сшивки функции (1), в то время как плотность вероятности в этих точках может отличаться в 2—3 раза. Дисперсия слабо зависит от асимптотического изменения плотности вероятностей отказов ввиду их незначительного вклада в дисперсию. Проектные оценки вероятности подобных аварий основывались на расчете надежности и вероятности отказов отдельных элементов оборудования. От расчета надежности отдельных элементов переходили к расчету надежности всей системы в целом. Такой подход не совсем верен, поскольку ИБР-2 относится к категории сложных объектов. Методологически понятие «сложный объект» заключается в том, что такой объект не может быть полностью описан на основе знаний о поведении отдельных его составляющих. В настоящей работе оценка вероятности отказов для $x > 4$ проводилась на основе реальных отказов для $x \leq 4$. Эти отказы в обобщенном виде уже содержат в себе реальные коэффициенты надежности элементов оборудования, которые могут и не совпадать с принятыми в проекте. Тем



Р и с. 3. Спектральная плотность колебаний событий: 1—3 — характерная частота спектра

не менее расчеты по изложенной методике согласуются с данными проектной надежности.

Частотный анализ отказов ИБР-2. Для исследования периодичности в появлении тех или иных категорий отказов используем классический спектральный анализ временных рядов на основе быстрого преобразования Фурье. После обычных процедур, предваряющих получение спектральных оценок (удаление среднего, детренд), для указанного на рис. 1 четырехкомпонентного временного ряда получены оценки периодичности возникновения отказов в виде спектральной плотности мощности. Результаты представлены на рис. 3.

Видно, что основная частота появления всех отказов наблюдается с периодом 1,9 года (точка 3) и почти полностью обусловлена отказами категорий П2 и П3. Дополнительно отказы категории П2 с гораздо меньшей интенсивностью происходят и с периодом 2,3 года (точка 2). Существенная доля отказов по категории П1 следует с периодом 8,13 года (точка 1). Нужно отметить, что 35% отказов происходят «бессистемно», т.е. по статистической терминологии являются «белым» шумом. Однако появление отдельных категорий отказов, таких, как П1, П2 и даже П3, более чем на 50% детерминировано и предсказуемо. Установить причину такой периодичности отказов ИБР-2 в данном исследовании невозможно. Статистической оценкой элемента временного ряда отказов было взято число отказов за год, поэтому основной период отказов, равный 1,9—2 года, есть лишь оценка минимально наблюдаемого периода. Анализ отказов по месяцам или кварталам работы реактора в данном случае не имеет надежной статистической точности.

Таким образом, вероятностный и спектральный методы анализа нарушений по категориям отказов дают информацию, необходимую для надежной и безопасной эксплуатации реактора. Полученные оценки вероятности появления событий, связанных с отказом оборудования, и аварий с тяжелыми последствиями согласуются с проектными требованиями, хотя и немного превышают их. Оценки превышения зависят от выбора аппроксимирующей функции

распределения вероятностей и выбора шкалы событий.

В заключение авторы выражают благодарность руководству ИБР-2 за оказанную помощь при работе с данными о нарушениях и отказах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе исследовательских ядерных установок

(НП-027-01). — Вестник Госатомнадзора России, 2001, № 2.

2. Букринский А.М., Федулов В.Ф. Международная шкала оценки опасности событий на АЭС. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 1, с. 3—8.
3. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. М.: Мир, 1989.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1974.

Поступило в Редакцию 1.08.07

Рефераты статей

Продолжение. Начало см. на с. 326

УДК 681.142.2

Александров С.И., Зайцев М.П., Ильина Л.И., Постников В.В., Юркин Г.В., Якунин И.С., Власов В.А. Оценка погрешности контроля распределения энерговыделения на основе условной плотности распределения вероятности. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 5, с. 294—298.

В расчетных и экспериментальных исследованиях показано, что общепринятое применение безусловной вместо условной плотности распределения вероятности в оценках погрешности контроля мощности наиболее напряженных топливных каналов активной зоны в реакторах широкого класса при среднеквадратичной погрешности контроля мощности более 1,5% приводит к систематическому занижению запаса до пределов безопасной эксплуатации примерно до 5 и 10% для режимов с использованием и без использования оперативной оптимизации распределений энерговыделения соответственно. При переходе от максимальной к средней мощности это завышение монотонно уменьшается до нуля. Рис. 3, табл. 2, список лит. 3 назв.

УДК 541.15 + 621.039.577

Архипов О.П., Верховская А.О., Кабакич С.А., Ермаков А.Н. Разработка и верификация математической модели радиолиза водяного пара. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 5, с. 299—302.

Разработана математическая модель радиолиза чистого водяного пара и водяного пара с добавками молекулярных водорода и кислорода. Верификация модели проведена с использованием известных в настоящее время экспериментальных данных о радиолизе водяного пара в широком диапазоне температуры и мощности дозы воздействующего ионизирующего излучения. Рис. 2, табл. 3, список лит. 12 назв.

УДК 621.039.546:620.193.2

Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Кондиров М.В., Мاستюкин В.П., Трубачев В.М., Фальковский Л.Н., Фонарев Б.И., Момот Г.В. Экспериментальное исследование работоспособности

защитных оболочек микротрещин применительно к условиям тяжелых аварий легководных реакторов. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 5, с. 302—309.

Применительно к условиям тяжелых аварий легководных реакторов с потерей теплоносителя исследована работоспособность (коррозионная стойкость и целостность) микротрещин с защитным покрытием из карбида кремния.

При испытаниях в синтетической парогазовой среде — продуктах сгорания пропана в кислороде, проводившихся в интервале 730—1670 °С, установлено, что при температуре до 1590 °С покрытие микротрещин обладает высокой коррозионной стойкостью и сохраняет свою целостность. При 1670 °С отмечена значительная до 25% повреждаемость микротрещин.

Микротрещины успешно выдержали испытания с нагревом до 800—1600 °С в воздушной атмосфере и последующим резким охлаждением в воде. Рис. 8, табл. 3, список лит. 5 назв.

УДК 621.039.73

Захарова К.П., Химченко О.М., Суханов Л.П., Александров В.В., Сальников А.А., Хромовских Е.В., Пушкарев В.М. Разработка технологического режима цементирования солевых концентратов Волгодонской АЭС. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 5, с. 309—314.

В статье приводятся результаты разработки технологического режима цементирования солевых концентратов Волгодонской АЭС. Экспериментами на модельных и реальных кубовых остатках из емкостей-хранилищ жидких отходов показано, что путем их дополнительного концентрирования и регулирования щелочности могут быть получены цементные компаунды с содержанием сухого остатка до 30% по массе. В качестве вяжущего материала может быть использован как портланд-, так и шлакопортландцемент. При соблюдении разработанных режимов качество образующихся цементных компаундов отвечает всем нормативным требованиям. Рекомендованный технологический режим реализован на установке цементирования Волгодонской АЭС. Рис. 1, табл. 3, список лит. 6 назв.