

УДК 621.039.534.6

О надежности обнаружения кипения натрия с помощью корреляции акустических и нейтронных шумов

КЕБАДЗЕ Б. В., АЛЕКСАНДРОВ К. А.

К числу перспективных методов обнаружения кипения натрия в активной зоне быстрого реактора относится регистрация акустических и нейтронных шумов. Поскольку статистические характеристики этих сигналов, взятых отдельно, могут изменяться и по другим причинам (кроме кипения), достоверность регистрации факта вскипания повышается при использовании метода взаимной корреляции сигналов [1]. Оценим статистическую надежность обнаружения вскипания (вероятности пропуска факта вскипания и ложного срабатывания), учитывая статистическую погрешность измерения параметров взаимной корреляции из-за некоррелированных фоновых шумов.

При оценках используем результаты экспериментов на БОР-60 [2], в котором кипение натрия осуществлялось во всем объеме тепловыделяющей сборки (ТВС) за счет нагрева вольфрамовых стержней γ -излучением. Флюктуации нейтронного потока измерялись ионизационной камерой, удаленной на 2,5 м от активной зоны; акустические сигналы — погружным пьезодатчиком, расположенным на расстоянии ~ 30 см от места схлопывания пузырей. Для корреляции с шумами нейтронного потока формировалась огибающая акустического сигнала при помощи выпрямителя и фильтра с постоянной времени ~ 30 мс. На рис. 1 показаны статистические характеристики шумов в частотной области, полученные фурье-преобразованием оценок корреляционных функций. Длительность реализаций ($T = 10$ мин) и выбранное разрешение по частоте ($\sim 0,1$ Гц) обеспечивают измерение спектральных плотностей с погрешностью до 10—15%. Особенностью спектров являются пики на частоте около 1 Гц, которые в режимах без кипения отсутствуют.

Экспериментами на стендах и расчетами показано [3, 4], что наличие резонансов характерно для процесса кипения натрия. Оно обусловлено либо периодическим образованием и схлопыванием парового пузыря при локальном кипении в условиях частичной блокировки, либо осцилляцией парового объема при перекрытии паром всего сечения ТВС; режим кипения в экспериментах на БОР-60 аналогичен последнему. Возможность обнаружения кипения по периодическому компоненту нейтронного шума рассматривалась в работе [3], вопрос о корреляциях различных сигналов в этой работе не затрагивался. Ввиду периодического характера процесса целесообразно характеризовать степень корреляции функцией когерентности (ФК):

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)},$$

которая в данных экспериментах составляла $\geq 0,9$. Преимущество использования ФК с точки зрения реализации системы обнаружения состоит в независимости ее от коэффициентов передачи измерительных трактов.

Рассмотрим задачу о статистической надежности обнаружения. Примем, что срабатывание системы происходит при превышении функцией когерентности некоторого порогового значения Π . Поскольку частота периодического компонента заранее неизвестна, необходимо вести контроль в некотором диапазоне — Δf , который, по данным [2] и другим источникам [1, 3], составляет 1—10 Гц. В стационарных режимах кипения периодический сигнал является довольно узкополосным — доли Гц (см. рис. 1). Учитывая, однако, что при развитии кипения, например с изменением мощности, частота осцилляции может меняться, выберем полосу разрешения $B = 1$ Гц, разбивая тем самым диапазон наблюдения на 10 каналов. При оценках вероятности погрешностей воспользуемся известным [5] соотношением для плотности распределения выборочных ФК для двух случайных процессов с нормальным законом распределения:

$$C = (n-1)(1-\gamma^2)^n(1-y)^{n-2}F(n, n; 1; \gamma^2y),$$

где γ^2 — истинное, а $y = \hat{\gamma}^2$ — выборочное значение функций когерентности; $n = BT$ — число степеней свободы, определяемое через полосу разрешения B и длительность измерения T ; F — гипергеометрическая функция четырех аргументов.

Оценим вероятность ложного срабатывания системы, учитывая, что в отсутствие кипения ФК равна нулю. Для этого случая функция распределения имеет вид

$$C_0 = (n-1)(1-y)^{n-2}.$$

Вероятность превышения заданного порога Π в одном

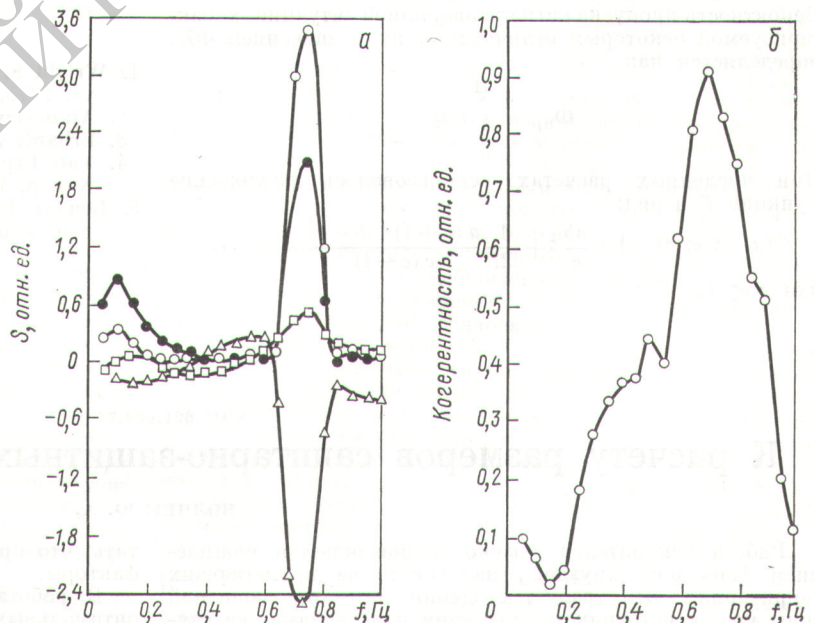
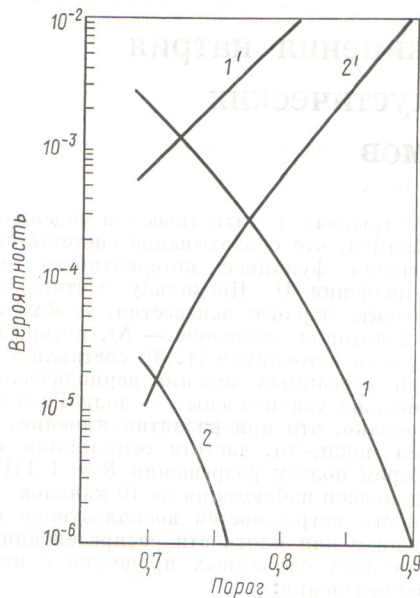


Рис. 1. Статистические характеристики шумов при кипении натрия в БОР-60: а — спектральных плотностей (S), нейтронного (N) и огибающей акустического (A) сигналов; \circ — S_{NN} ; \bullet — S_{AA} ; \square — $\text{Re}S_{NA}$; \triangle — $\text{Im}S_{NA}$; б — функция когерентности акустического и нейтронного сигналов



Р и с. 2. Вероятности пропуска сигнала аварии ($1'$, $2'$) и ложного срабатывания (1 , 2) как функция порога для ФК: 1 , 2 — $n = 8$ и 12 при $\gamma^2 = 0$; $1'$, $2'$ — $\gamma^2 = 0,92$ и $0,95$ при $n = 8$

частотном интервале:

$$\Phi(>\Pi) = \int_{\Pi}^1 C_0 dy = (1 - \Pi)^{n-1} = p.$$

Вероятность ложного срабатывания, т. е. превышения порога хотя бы в одном из интервалов:

$$\Phi_{\Sigma} = 1 - (1 - p)^m.$$

Вероятность пропуска сигнала аварийной ситуации, характеризующейся некоторым отличным от нуля значением ФК, определяется как

$$\Phi_{\text{пр}} = \int_0^{\Pi} C dy.$$

При численных расчетах использовалось разложение функции F в ряд:

$$F(a, b; c; z) = 1 + \frac{ab}{c} z + \frac{1}{2!} \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1)} z^2 + \dots$$

для $z < 1$.

Расчеты вероятностей ложного срабатывания и пропуска сигнала для некоторых значений параметров n и γ^2 , приведенные на рис. 2, показывают, что даже при сравнительно больших значениях когерентности и соответствующего порога для достижения примерно одного ложного срабатывания в год необходима длительность реализации более 10 с. При этом выбором порога может быть обеспечена достаточно малая вероятность пропуска аварии.

В условиях этого эксперимента соотношение сигналов кипения и фона для нейтронных шумов благоприятнее, чем для акустических. Учитывая спектральную плотность флюктуаций нейтронного потока в области резонанса без кипения и при кипении и распределение их оценок χ^2 [3, 5], можно показать, что для данных значений B , T , Δf , m выбор порога позволяет обеспечить вероятность погрешностей первого и второго рода $< 10^{-6}$. Очевидно, что в данном случае использование наряду с ФК также спектральной плотности позволяет улучшить характеристики системы обнаружения. Это достигается, в первую очередь, за счет снижения вероятности ложного срабатывания. Выбор порогов обнаружения и сочетания контролируемых параметров (спектров, ФК) должен проводиться в каждом конкретном случае с учетом реальных соотношений сигнал/шум.

Следует отметить, что приведенные в настоящей работе оценки предполагают наличие стационарных случайных процессов с нормальным законом распределения. Периодические же флюктуации при кипении представляют собой зачастую не узкополосный случайный процесс, а скорее автоколебания на фоне случайных помех. Это обстоятельство повышает надежность обнаружения. В быстром реакторе большой мощности соотношение фона и шумов кипения из-за большей удаленности акустических датчиков от места кипения и меньших эффектов реактивности может оказаться не столь благоприятным, как в рассмотренном случае, что приведет к снижению надежности обнаружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wright S., Albrecht R., Edelman M. «Ann. Nucl. Energy», 1975, v. 2, p. 367.
2. Afanasiev V. A. e.a. Preprint Zfk-344. Dresden, 1977.
3. Erhardt J. «Nucl. Technol.», 1976, v. 31, N 1, p. 123.
4. Van Erp J. e.a. «Nucl. Engng Design», 1972, v. 15, N 4, p. 441.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., «Мир», 1974.

Поступило в Редакцию 15.09.78

УДК 621.039.78

К расчету размеров санитарно-защитных зон вокруг ускорителей

ВОЛЧЕК Ю. А.

Работа ускорителей обычно сопровождается повышением фона ионизирующих излучений на прилегающих территориях. Это требует создания санитарно-защитной зоны между источником излучения и объектами, не связанными с работой установки. В результате теоретических и экспериментальных исследований рассеянного излучения за защитой ускорителей разработан метод прогнозирования радиационной обстановки на территории проектируемых ускорителей [1]. Однако надо отме-

тить, что при этом остаются неучтенными экономические факторы.

В работах [2, 3] предложена методика определения оптимальных параметров защиты с позиций экономичности и показано, что при сооружении и эксплуатации ускорителей сочетание конструктивного метода защиты и санитарно-защитной зоны может дать значительный экономический эффект. Зависимость для оптимальной толщины боковой x и верхней y защиты, радиуса r санитарно-защит-