

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

Атомная
Энергия

Ежемесячный журнал
год издания двенадцатый

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 25 ■ Октябрь ■ Вып. 4

Главный редактор
М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ

Заместители главного
редактора:

Н. А. ВЛАСОВ, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ

Редакционная коллегия:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, И. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, А. К. КРАСИН,
А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, П. Н. ПАЛЕЙ,
Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. В. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

- В. Б. Осипов, Р. В. Джагацания, А. С. Штань,
В. М. Симонов, С. В. Мамиконян, Л. Д. Солодихина,
Д. П. Бодров, С. В. Голубков, Ю. Г. Ляскин.
Радиационный сульфохлоратор РС-2,5 271
- Г. Н. Баласанов, Д. Я. Суражский, Б. А. Чумаченко,
А. А. Дерягин, Е. П. Власов. Использование мате-
матических методов при поисках месторождений
урана 274
- А. А. Шолохов, В. Е. Минашин. Теплообмен при про-
дольном течении жидкости в пучках стержней 280
- Б. Н. Селиверстов, А. И. Ефанов, Ю. М. Быков,
П. А. Гаврилов, Л. В. Константинов. Некоторые
вопросы приложения статистических методов
к задачам оперативного исследования кинети-
ческих характеристик реакторов 287
- В. И. Голубев, Н. Д. Голяев, А. В. Звонарев, М. Н. Зи-
нин, Ю. Ф. Колеганов, М. Н. Николаев, М. Ю. Ор-
лов. Распространение нейтронов в двуокиси
урана 292
- Часть I. Пространственно-энергетические распре-
деления 292
- Л. П. Абагян, В. И. Голубев, Н. Д. Голяев, А. В. Зво-
нарев, Ю. Ф. Колеганов, М. Н. Николаев,
М. Ю. Орлов. Распространение нейтронов в дву-
окиси урана 297
- Часть II. Допплер-эффект на U^{235} 297
- А. И. Громова, И. К. Морозова, В. В. Герасимов. Влия-
ние облучения на электрохимическое поведение
конструкционных материалов 302
- Р. А. Беляев, Ю. И. Данилов, С. А. Фураев. Корро-
зия длинномерных изделий из окиси бериллия в
газовых влагосодержащих потоках 305
- А. Ф. Настоящий. О функции распределения электро-
нов в неоднородной слабоионизованной плазме 308

АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

- Р. В. Джагацания, В. Б. Осипов, Л. Д. Солодихина,
Ю. Г. Ляскин, А. И. Гершенович. Опыт эксплуа-
тации радиационно-химического сульфохлорато-
ра РС-2,5 314
- В. Б. Осипов, Л. Д. Солодихина, Д. П. Бодров,
В. М. Симонов, Р. В. Джагацания. Применение
кассет сферической формы для создания протяж-
енных облучателей опытно-промышленных и промыш-
ленных радиационно-химических установок 315
- Э. И. Кузнецов. Время жизни заряженных частиц в
плазме на установке «Токамак ТМ-3» 315
- Н. С. Мартынова, И. В. Василькова, М. П. Сусарев,
С. С. Толкачев. Термографическое и рентгено-
структурное изучение системы $UCl_4 - KCl - NaCl$ 316
- В. Ф. Баранов, О. А. Павловский. О прохождении
электронов через вещество 317
- П. П. Зольников, Е. Г. Голиков, К. А. Суханова,
Б. Л. Двинянинов. Отражение тормозного излу-
чения бетатрона барьерами из различных матери-
алов 318
- П. А. Фефелов. Исследование влияния излучений
на прочность стеклопластиков 318

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- В. Б. Осипов, В. П. Гутеев, Р. В. Джагацания,
А. И. Гершенович, С. В. Голубков. Техничко-эконо-
мические аспекты радиационного способа произ-
водства сульфоната 320
- Н. Т. Чеботарев, А. В. Безносикова. Исследование
структуры соединения $CaUF_6$ 321
- Б. П. Пritchett. К динамике выделение накопленного
радиона при нагревании горной породы 324

235307



Некоторые вопросы приложения статистических методов к задачам оперативного исследования кинетических характеристик реакторов

Б. Н. СЕЛИВЕРСТОВ, А. И. ЕФАНОВ, Ю. М. БЫКОВ,
П. А. ГАВРИЛОВ, Л. В. КОНСТАНТИНОВ

УДК 621.039.514.4

Идея осуществления обработки сигналов шумов мощности реактора для определения технологических нарушений в активной зоне реактора нашла отражение в ряде работ (см., например, [1—3]). Однако в большинстве из них авторы ограничивались лишь качественным рассмотрением закономерностей наблюдаемых эффектов.

Объектом настоящего исследования был выбран реактор небольших размеров малой мощности типа ИРТ-4000. К данному типу реактора можно применить обычную точечную модель кинетики без обратных связей. Кроме того, для этого реактора ранее были определены кинетические характеристики детерминированным методом [4].

В процессе нормальной эксплуатации определялся спектральный состав шумов невозмущенного и возмущенного реактора. В возмущенном реакторе моделировался процесс возникновения очага пристеночного кипения посредством барботирования азота в кассете, расположенной в активной зоне. Искусственное моделирование пристеночного кипения в активной зоне реактора позволило установить некоторые количественные соотношения между мощностью генерации пара и спектральным составом шума мощности реактора.

Реализации случайных сигналов, полученные в виде осциллограмм, обрабатывались в дискретной форме на ЦВМ БЭСМ-3М с применением специализированной системы оперативной обработки данных с накоплением их на перфокартах (или перфоленте). Особое внимание было уделено методике обработки информации: 1) проведен анализ процедуры вычисления оценки спектра мощности с целью получения количественного инженерного критерия для выбора необходимого интервала наблюдения процесса и для определения оптимальной длины «скользящего интервала» при вычислении текущего значения оценки спектральной плотности (в задачах автоматического контроля режима объекта); 2) предложено применение алгоритма (и программы) вычисления оценки спектра мощности на ЦВМ при автоматическом вводе данных.

О методике экспериментально-статистического исследования кинетических характеристик реактора

Теория статистических методов исследования ядерных реакторов изложена в работах [5—7]. Ниже приводятся основные соотношения, которые в дальнейшем используются для анализа и обработки результатов измерений.

Спектральная плотность шумов тока ионизационной камеры для случая, когда регистрируются флуктуации реактивности, вызванные внешними возмущениями, имеет вид

$$S(f) = 2Q^2 \left\{ \varepsilon F \left[1 + \varepsilon \frac{(\bar{v}-1)\bar{v}}{(\bar{v})^2} |J_0(f)|^2 \right] + \varepsilon^2 F^2 |J_0(f)|^2 S_{\text{вн}}(f) \right\}, \quad (1)$$

где Q — заряд, созданный одним нейтроном, поглощенным в камере; $J_0(f)$ — модуль передаточной функции реактора нулевой мощности; F — число делений в секунду; ε — эффективность камеры, определяющая отношение числа нейтронов, поглощенных камерой, к полному числу нейтронов в объеме реактора; \bar{v} — среднее число нейтронов на одно деление; $S_{\text{вн}}(f)$ — спектральная плотность флуктуации внешней реактивности. Из уравнения (1) видно, что спектральная плотность шумов тока ионизационной камеры (обусловленная внешними возмущениями) пропорциональна квадрату произведения мощности и эффективности детектора, в то время как спектральная плотность шума детектора линейно связана с этим произведением. Отсюда следует, что применение высокоэффективного детектора является наиболее важным моментом при изучении кинетических характеристик реактора статистическим методом.

Объект экспериментального исследования является обычно источником лишь единственной реализации случайного процесса $x(t)$. В работе [8] показано, что частный спектр мощности, вычисленный по этой реализации, и спектр мощности для совокупности эквивалентны при допущениях стационарности и эргодичности, если время наблюдения $T \rightarrow \infty$. Однако вслед-

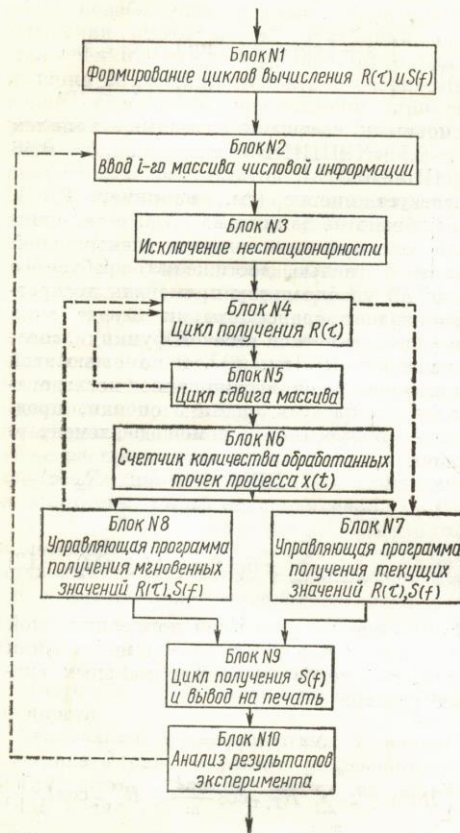


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы ЦВМ.

В работах [12, 13] показано, что получение дискретной последовательности путем периодического мгновенного отбора [14] из непрерывного сигнала приводит к спектральной плотности этой последовательности вида

$$S_x^*(f) = \frac{1}{T_S} \sum_{r=-\infty}^{\infty} S_x(f - r f_s), \quad (14)$$

где $S_x(f)$ — спектральная плотность исходного непрерывного сигнала, T_S и f_s — соответственно период и частота отбора. Так как реальные случайные сигналы не могут иметь спектр в ограниченной полосе частот, то неизбежным является пересечение всех r -х смещенных функций [см. правую часть выражения (14)].

Таким образом, спектральная плотность дискретной последовательности при всех значениях f является результатом сложения бесконечного ряда смещенных спектральных плотностей и вследствие этого ни в одном интервале частот (в том числе и в «основном интервале» $[-\frac{f_s}{2}, \frac{f_s}{2}]$) не может идеально повторять спектральную плотность исходного сигнала. Изменение же спектральной плотности эквивалентно появлению некоторой ошибки в дискретной последовательности относительно исходного сигнала. При выборе частоты отсчетов можно применять соотношение, характеризующее относительный уровень спектра мощности на частоте $0,5 f_s^*$. Подобное соотношение можно представить в виде

$$\frac{\sum_{r=-\infty}^{\infty} S_x(0,5 f_s - r f_s)}{\sum_{r=-\infty}^{\infty} S_x(r f_s)} \leq \varepsilon, \quad (15)$$

где ε — достаточно малая (например, порядка нескольких процентов) величина.

В качестве спектральной плотности $S_x(f)$, входящей в это выражение, можно пользоваться предполагаемой заранее спектральной плотностью процесса**. При отсутствии такой априорной информации условие (15) служит для установления соответствия выбранного режима вычислений допустимой результирующей величине перекрытия спектров на частоте $0,5 f_s$ и, следовательно, может быть использовано для уточнения режима повторных циклов этих вычислений. Чтобы исключить влияние погрешностей вследствие дискретного представления данных, фильтры, применявшиеся для устранения низких частот, выполнялись в виде полосовых, что одновременно позволяло практически исключить присутствие существенных компонент сигнала и на частотах вблизи $0,5 f_s$.

Экспериментальное оборудование

Шумовые составляющие нейтронной плотности регистрировались с помощью ионизационной

* Для каждого конкретного значения $S_x(f)$ этот уровень однозначно характеризует и результирующие искажения в $S_x^*(f)$.

** Чаше всего некоторые приближенные данные о спектре процесса (например, об его эквивалентной ширине) имеются заранее в распоряжении исследователя.

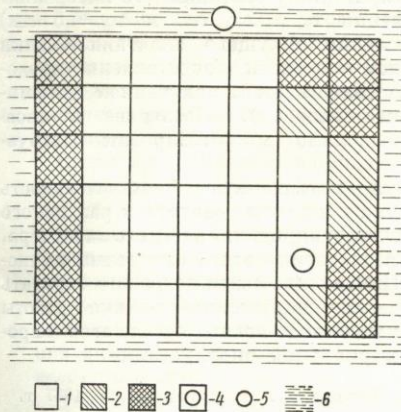


Рис. 2. План активной зоны:

1 — кассета с твэлами; 2 — кассета с бериллием; 3 — кассета с графитом; 4 — место установки кассеты с водой в эксперименте с барботажем (ячейка 2—5); 5 — вертикальный экспериментальный канал для камеры; 6 — вода.

камеры КНК-56, помещенной в вертикальный канал реактора (рис. 2).

При проведении экспериментов с барботажем кассета удалялась из ячейки 2—5 и на ее место ставился тонкостенный канал, заполненный водой. Ток от ионизационной камеры, помещенной в этот канал, подавался на электрометрический усилитель, выходной сигнал которого через *RC*-фильтр попадал на основной усилитель. Параметры *RC*-фильтра были выбраны из условия подавления постоянной составляющей и спектра ВЧ-компонент флуктуации мощности реактора. Выходной сигнал усилителя записывался на высокоскоростной шлейфовый осциллограф. Была измерена амплитудно-частотная характеристика измерительного тракта, с учетом которой в дальнейшем корректировались полученные результаты.

Предварительная оценка эффективности камеры проводилась следующим образом. Камера погружалась в экспериментальный канал и фиксировалась в нескольких точках относительно высоты активной зоны реактора и вне ее. Для каждого положения камеры на осциллографе измерялась ширина шумовой дорожки. При этом величина среднего тока поддерживалась постоянной за счет изменения мощности. Затем определялось максимальное значение отношения ширины дорожки погруженного детектора к ширине дорожки детектора, удаленного

на некоторое расстояние от активной зоны.

В случае возмущенного режима работы реактора через канал с водой, помещенный в ячейке 2—5, барботировался азот. Азот вызывал изменение реактивности, которое компенсировалось автоматическим регулятором, затем регулятор отключался и осуществлялась непрерывная запись флуктуаций мощности. Измерение проводилось на малых уровнях мощности реактора (10—50 *вт*) для нескольких значений расхода азота (0,1—1 *л/сек*).

Результаты эксперимента

На рис. 3 приведено распределение спектральной плотности шумов мощности невозмущенного реактора, полученное по данным нескольких серий измерений.

Для диапазона частот выше 1 *гц* методом наименьших квадратов по экспериментальным точкам построена кривая вида

$$a_0 + \frac{a}{1 + \left(2\pi \frac{l}{\beta_{эфф}} f\right)^2}.$$

Значение $l/\beta_{эфф}$ составляет $(0,88 \pm 0,11) \times 10^{-2}$ *сек*. Для сравнения укажем, что измеренное осциллятором методом [4] значение $l/\beta_{эфф}$ этого реактора составило $(0,8 \pm 0,05) \times 10^{-2}$ *сек*. В низкочастотной области зависимость квадрата амплитуды передаточной функции (пунктирная линия) была получена расчетным путем по известным формулам амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). При частоте $f = 1$ *гц* расчетные и экспериментальные кривые совмещались. В области частот до 1 *гц* наблюдается некоторое отклонение экспериментальных точек от расчетной кривой.

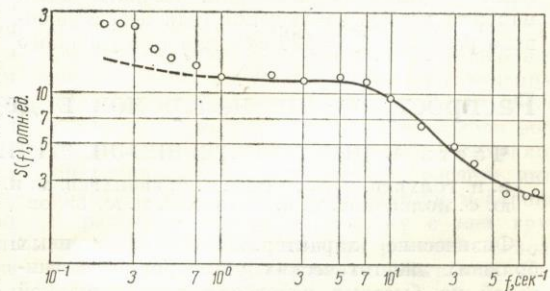


Рис. 3. Распределение спектральной плотности шумов мощности для невозмущенного реактора:
○ — экспериментальные точки; --- — расчетная кривая.

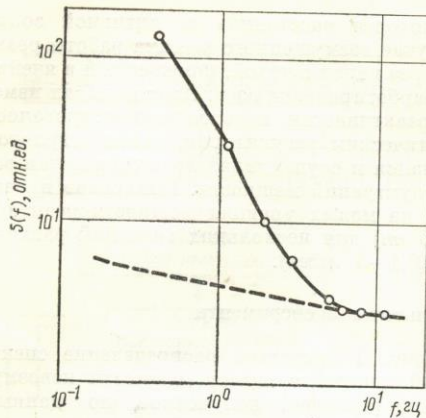


Рис. 4. Распределение спектральной плотности шумов мощности для возмущенного реактора:
 ○ — экспериментальные точки для возмущенного реактора; — — квадрат модуля передаточной функции невозмущенного реактора.

На рис. 4 спектральная плотность возмущенного реактора сопоставлена с частотной зависимостью квадрата модуля передаточной функции невозмущенного реактора.

Расход азота через активную зону равнялся 0,1 л/сек, что соответствует генерации пара 0,3 кг/ч. Объем пустот составляет 0,5% объема воды в активной зоне реактора. Из рисунка следует, что введение незначительного объема пустот в активную зону реактора вызывает существенную деформацию спектральной плотности мощности реактора. Дальнейшее увеличение расхода от 0,1 до 1 л/сек вызывает практически линейный рост дисперсии процесса без заметного искажения формы его спектра.

Требуемая статистическая достоверность (коэффициент вариации $\mathcal{K} = 0,0625$) получаемых результатов позволила выбрать оптимальный период наблюдения (для невозмущенного реактора $T = 120$ сек, для возмущенного

$T = 240$ сек) и длину «скользящего интервала» (соответственно $\tau_m = 2,5$ сек и $\tau_m = 5$ сек) при вычислении текущего значения оценки спектральной плотности (сопоставление проводилось с АЧХ реактора, полученной детерминированным способом). Последнее в свою очередь позволило минимизировать загрузку ЦВМ.

Используя повышенную чувствительность спектра шума мощности реактора к различного рода аномалиям гидродинамического характера, а также предлагаемые здесь алгоритмы вычислений на ЦВМ, можно надежно диагностировать технологические нарушения режима работы широкого класса водо-водяных реакторов в процессе их нормальной эксплуатации.

Поступила в Редакцию 27/IV 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Boyd. Nucleonics, 17, 96 (1959).
2. A. Eugola. ANL-6369 (1961).
3. V. Rajagopal. In book: «Noise Analysis in Nuclear Systems». US AEC4, Symposium series, 1964, p. 427.
4. Л. В. Константинов и др. «Атомная энергия», 15, 332 (1963).
5. A. Thie. Reactor Noise. N.Y., 1963.
6. Noise Analysis in Nuclear Systems. US AEC4, Symposium series, 1964.
7. А. И. Могильнер, Д. М. Швецов. «Атомная энергия», 2, 117 (1966).
8. Д. Миддлтон. Введение в статистическую теорию связи. Т. II. М., «Сов. радио», 1961, 1962.
9. М. Г. Такер. В сб. «Определение параметров случайных процессов». Киев, Гостехиздат, 1962, стр. 58.
10. Л. М. Спетнер. Там же, стр. 73.
11. Ш. С. Л. Чанг. Синтез оптимальных систем автоматического управления. М., «Машиностроение», 1964.
12. R. Blackman, J. Tukey. The Measurement of Power Spectra. Dover, publ., N. 4 (1958).
13. Э. Джурри. Импульсные системы автоматического регулирования. М., Физматгиз, 1963.
14. Я. З. Цыпкин. Теория импульсных систем. М., Физматгиз, 1958.

Распространение нейтронов в двуокиси урана

Часть I. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В. И. ГОЛУБЕВ, Н. Д. ГОЛЯЕВ, А. В. ЗВОНАРЕВ, М. Н. ЗИЗИН,
 Ю. Ф. КОЛЕГАНОВ, М. И. НИКОЛАЕВ, М. Ю. ОРЛОВ

УДК 621.039.51

Физические характеристики современных больших энергетических реакторов-размножителей на быстрых нейтронах в значительной степени определяются нейтроннофизическими свойствами окиси природного или обедненного

урана, которая является основным материалом для зон воспроизводства и в больших концентрациях содержится в активных зонах этих реакторов. Вследствие упругого замедления на кислороде спектр нейтронов в оксидных реакто-