

денных авторами на установке с вертикальной и «потолочной» поверхностью конденсации, были получены значения термического сопротивления фазового перехода, согласующиеся с расчетом по газокINETической теории при значении β'' также равном единице [5]. (На поверхности раздела пар — несмачиваемая ртутью стенка коэффициент конденсации, как показано в работе [5], близок к нулю. Поверхность стенки, не покрытая каплями, практически не участвует в процессе тепло- и массопереноса.)

Таким образом, для расчета коэффициента теплоотдачи как при пленочной, так и при капельной конденсации технически чистой ртути следует использовать значение β'' , равное единице.

В разработке конструкции экспериментальной установки принимал участие Л. Л. Кобзарь.

Поступила в Редакцию 24/II 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Rich. *Helv. phys. acta*, VI, 128 (1933).
2. Д. Хирс, Г. Паунд. Испарение и конденсация. Перев. с англ. М., «Металлургия», 1966, стр. 88, 93.
3. M. Knudsen. *Ann. Phys. Lpz*, 29, 179 (1909); 47, 697 (1915).
4. M. Volmer, J. Estermann. *Z. Phys.*, 7, 4 (1921).
5. М. Н. Ивановский, Ю. В. Милованов, В. И. Субботин. «Теплоэнергетика», № 6, 81 (1967).
6. S. Sukhatme, W. Rohsenow. *Trans. ASME*, 88 (Series C), 19 (1966).
7. В. И. Субботин и др. «Теплофизика высоких температур», 2, 616 (1964).
8. Н. К. Адам. Физика и химия поверхностей. Перев. с англ. М., ОГИЗ, 1947.

Контроль уровня мощности реактора со статистической дискриминацией γ фона

А. И. МОГИЛЬНЕР, С. А. МОРОЗОВ

УДК 621.039.56

В настоящее время контроль уровня мощности ядерных реакторов в основном осуществляется двумя способами: импульсным (уровень мощности определяют по скорости счета импульсов нейтронного детектора, регистрирующего поток нейтронов ядерного реактора) и токовым (уровень мощности находят по величине тока нейтронного детектора).

К достоинствам первого способа следует отнести возможность измерения низких уровней мощности реактора с практически полным исключением влияния γ -фона на результаты измерения. Недостаток этого способа — ограниченный диапазон измеряемых мощностей (обычно 3—4 порядка).

Токовый способ, как правило, используется для контроля высоких уровней мощности. Его существенным недостатком является трудность ликвидации погрешности измерения, обусловленной γ -фоном.

Действительно, в присутствии γ -фона, обычно сопровождающего работу реактора, к нейтронной составляющей тока детектора добавляется γ -компонента. Суммарный ток детектора равен

$$I = I_n + I_\gamma, \quad (1)$$

где

$$I_n = \varepsilon_n \Phi_n \bar{q}_n; \quad I_\gamma = \varepsilon_\gamma \Phi_\gamma \bar{q}_\gamma;$$

Φ_n (Φ_γ) — поток нейтронов (γ -квантов), пересекающих поверхность детектора; ε_n (ε_γ) — доля регистрируемых нейтронов (γ -квантов); $\bar{q}_n$ ($\bar{q}_\gamma$) — средний собираемый заряд при регистрации нейтрона (γ -кванта).

При работе энергетического реактора на мощностях, близких к номинальной, вклад γ -компоненты незначителен и ток детектора пропорционален потоку нейтронов. Однако при снижении мощности эта пропорциональность может существенно нарушаться. Поскольку импульсные и токовые системы контроля должны иметь перекрытие диапазонов измеряемой мощности, необходимо принимать меры для уменьшения γ -составляющей тока детектора.

Существуют различные методы, уменьшающие погрешность измерения, обусловленную γ -фоном. Одним из наиболее распространенных является метод использования в качестве детекторов нейтронов компенсированных борных камер (КНК-53, КНК-56). Обычная величина коэффициента компенсации γ -компоненты тока в таких камерах не превышает 100 [1].

Ниже описывается метод, обеспечивающий контроль уровня мощности реактора (потока нейтронов) с помощью обычных некомпенсированных детекторов в токовом режиме, позволя-

ющий достичь значительной физической дискриминации γ -фона.

В данном методе используется не постоянная составляющая ионизационного тока, а его флуктуационная часть. Наличие последней обусловлено главным образом случайным и дискретным характером регистрации излучения. Согласно формуле Шоттки для дробового эффекта, с достаточной точностью описывающей процессы в камере, спектральная плотность флуктуаций ионизационного тока в области низких частот равна

$$S_n = 2\bar{q}_n I_n \quad (2)$$

или

$$S_n = 2\varepsilon_n \Phi_n \bar{q}_n^2. \quad (3)$$

Таким образом, ионизационную камеру в условиях, принятых для контроля уровня мощности реактора, можно рассматривать как источник «белого» шума, спектральная плотность которого пропорциональна потоку нейтронов.

В присутствии γ -фона спектральная плотность флуктуаций складывается из двух компонент

$$S = 2(\varepsilon_n \Phi_n \bar{q}_n^2 + \varepsilon_\gamma \Phi_\gamma \bar{q}_\gamma^2) \quad (4)$$

в предположении некоррелированности двух случайных процессов — актов регистрации нейтронов и γ -квантов, а также случайных величин соответствующих зарядов. Поскольку в обычных детекторах нейтронов (борных камерах, камерах деления) величина $\bar{q}_n \gg \bar{q}_\gamma$ (в силу высоких ионизирующих способностей α -частиц и осколков деления), то при использовании метода, основанного на измерении флуктуаций, относительный вклад γ -компоненты является значительно более низким, чем в постоянной составляющей ионизационного тока. Если в среднем значении тока отношение двух компонент равно

$$\bar{\kappa} = \frac{\varepsilon_n \Phi_n \bar{q}_n}{\varepsilon_\gamma \Phi_\gamma \bar{q}_\gamma}, \quad (5)$$

то при использовании флуктуационного метода

$$\tilde{\kappa} = \frac{\varepsilon_n \Phi_n}{\varepsilon_\gamma \Phi_\gamma} \cdot \frac{\bar{q}_n^2}{\bar{q}_\gamma^2}. \quad (6)$$

Таким образом, применение статистической дискриминации обеспечивает выигрыш в относительной нечувствительности к γ -фону в

$$\eta = \frac{\tilde{\kappa}}{\bar{\kappa}} = \frac{\bar{q}_n^2}{\bar{q}_\gamma^2} \cdot \frac{\bar{q}_\gamma}{\bar{q}_n} \approx \frac{\bar{q}_n}{\bar{q}_\gamma}. \quad (7)$$

Отношение (7) будет иметь особенно большую величину при использовании в качестве

детектора камеры деления. Практическое применение метода статистической дискриминации требует учета ряда факторов. Прежде всего должна быть обеспечена достаточная широкополосность измерителя флуктуаций тока детектора, так как чувствительность и относительная статистическая точность измерения флуктуаций зависят от ширины спектра измеряемых флуктуаций. Другой важный момент, который следует учитывать, — это необходимость квадратично детектировать флуктуационную составляющую тока до ее усреднения для получения величины, пропорциональной спектральной плотности (а следовательно, и уровню мощности реактора). В результате показания прибора, контролирующего мощность реактора, будут пропорциональны величине

$$N_\Phi = S \int_0^\infty F(f) df, \quad (8)$$

где $F(f)$ — частотная характеристика измерительного устройства (квадрат модуля передаточной функции).

Точное квадратичное детектирование флуктуаций представляет собой довольно сложную задачу. Однако, если предположить, что флуктуации тока детектора имеют распределение, близкое к нормальному [2], можно заменить квадратичное детектирование линейным. В этом случае средний уровень флуктуаций пропорционален корню квадратному из уровня мощности реактора. Именно на этом принципе был построен логарифмический измеритель мощности, описанный в работе [3].

Для проверки метода был сконструирован прибор, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Прибор состоит из детектора нейтронов, усилителя переменного тока с полосой пропускания $f_{\text{низ}} \div f_{\text{выс}} = 500 \text{ гц} \div 15 \text{ кгц}$, квадратичного выпрямителя и регистратора. Как уже было сказано выше, в качестве детектора нейтронов желательно использовать камеру деления или борную камеру, т. е. детектор с наибольшим отношением $\bar{q}_n/\bar{q}_\gamma$. Следует также учитывать, что частотные характеристики детекторов ограничены в области верхних частот из-за конечного времени собирания ионов. Частотные характеристики различных детекторов исследовались в работах [4–6]. Как показано в этих работах, ширина полосы пропускания детекторов в зависимости от конструкции, наполнения и величины рабочего напряжения может меняться от десятков герц до нескольких килогерц.

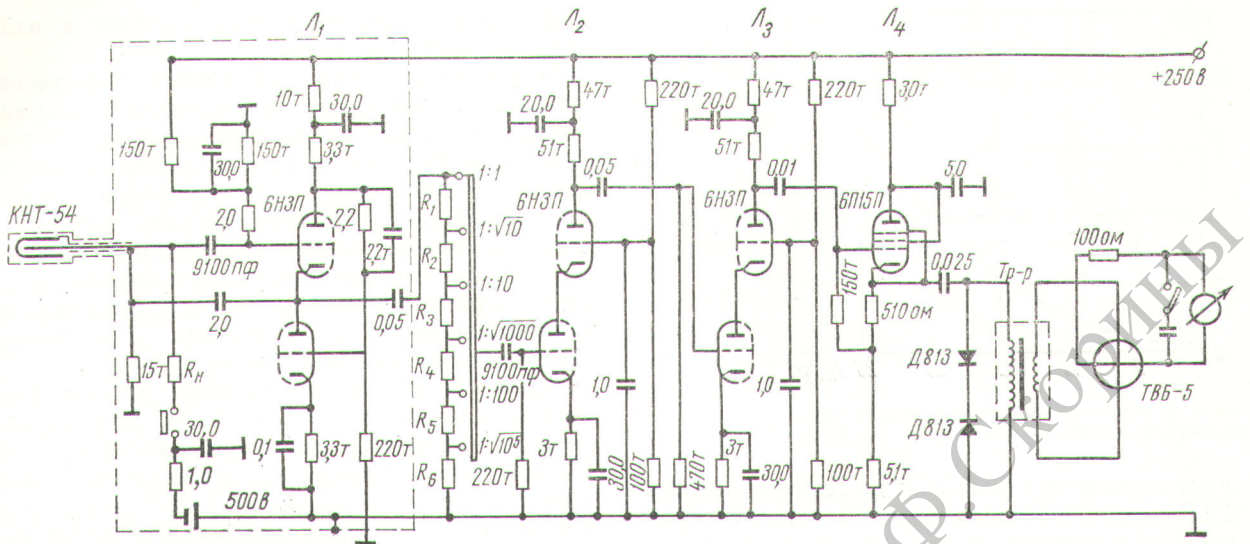


Рис. 1. Принципиальная схема прибора.

В описываемом приборе использовалась камера деления КНТ-54, частотная характеристика которой приведена на рис. 2. Для получения достаточно высокой чувствительности прибора нагрузка детектора должна иметь возможно большую величину. Но поскольку сигнал с детектора приходится транслировать по длинному кабелю, увеличение нагрузки детектора приводит к сужению полосы частот сигнала. Действительно, нагрузкой детектора в этом случае служит фильтр низкой частоты, образованный сопротивлением нагрузки R_n и емкостью детектора C_d и кабеля C_k . Его полоса пропускания

$$\omega_T = \frac{1}{R_n(C_d + C_k)}$$
 может быть расширена, если при заданном R_n каким-либо образом скомпенсировать емкости детектора и кабеля. В данном приборе для передачи сигнала от детектора к усилителю использовался двухэкранный кабель типа АВКЭ-1. Первый экран кабеля, соединенный с корпусом детектора, подключался (см. рис. 1) к выходу каскодного повторителя (лампа L_1), имеющего коэффициент передачи K_n , близкий к единице ($K_n = 0,985$).

При такой схеме включения суммарная емкость детектора и кабеля компенсируется до величины

$$C_{эв} = (C_d + C_k)(1 - K_n), \quad (9)$$

что позволяет при нагрузке детектора $R_n = 1 \text{ мом}$ транслировать сигнал от детектора

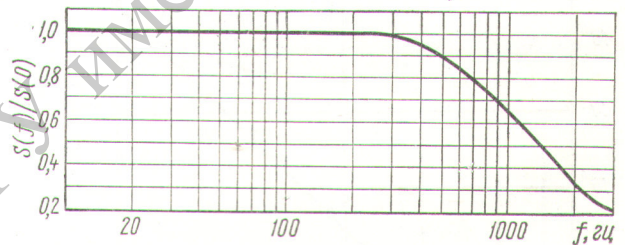


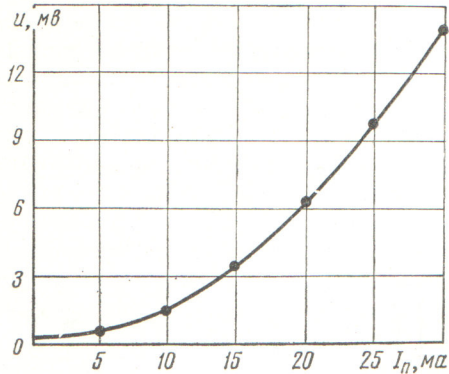
Рис. 2. Частотная характеристика камеры деления КНТ-54 (рабочее напряжение 300 в).

по длинному кабелю ($\sim 40 \text{ м}$) без существенных искажений спектра флуктуаций. Выходной сигнал каскодного повторителя подается на линейный усилитель, состоящий из двух реостатно-емкостных каскадов, собранных по каскодной схеме. Атенюатор на входе усилителя (сопротивления $R_1 - R_6$) позволяет дискретно изменять чувствительность прибора в пределах 50 дб.

Усиленные флуктуации тока камеры квадратично детектируются.

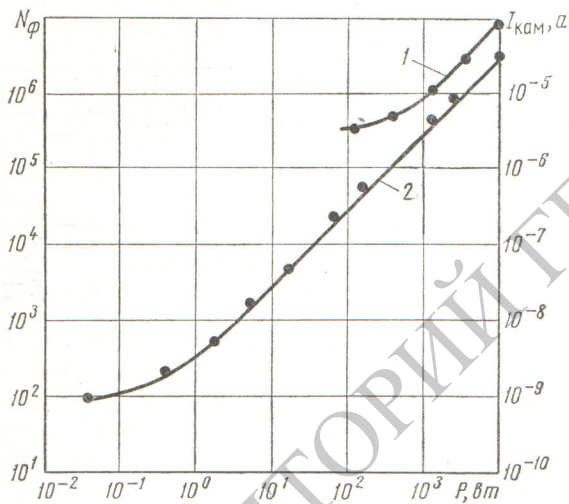
В качестве квадратора в приборе используется термопреобразователь типа ТВБ-5, амплитудная характеристика которого приведена на рис. 3. Для защиты термопреобразователя от перегрузок применяется ограничитель выходного сигнала, собранный на стабилотронах Д813.

Измерения с помощью описываемого прибора проводились на исследовательском энергетическом



Р и с. 3. Амплитудная характеристика термопреобразователя ТВВ-5.

ческом реакторе БР-5 [7]. Камера деления КНТ-54 помещалась в один из измерительных каналов реактора, и уровень мощности одновременно контролировался по двум величинам — ионизационному току камеры и величине флуктуаций тока.



Р и с. 4. Результаты контроля уровня мощности реактора Р: 1 — по измерению тока камеры $I_{\text{кам}}$; 2 — по измерению величины флуктуаций тока.

Результаты этих измерений приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, пропорциональность между величиной флуктуаций тока камеры и уровнем мощности реактора наблюдается в диапазоне, на три порядка большем по сравнению с пропорциональностью между током камеры и уровнем измеряемой мощности. Эти данные позволили оценить нижнюю границу величины относительного коэффициента нечувствительности η к γ -фону. Для камеры деления эта величина равна $\eta_d \geq 780$.

Ранее авторами настоящей работы была измерена аналогичная величина для борного детектора, которая оказалась равной $\eta_b = 50$. Сравнение величины относительного коэффициента нечувствительности η_d для камеры деления с реальной величиной коэффициента компенсации в компенсированных камерах позволяет сделать вывод о преимуществе описанного способа контроля уровня мощности ядерных реакторов.

В заключение авторы выражают благодарность Д. И. Жесткову и В. М. Стекловскому за помощь в проведении эксперимента.

Поступила в Редакцию 8/IV 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Дмитриев и др. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 59 (1959).
2. C. Cohn. Nucl. Sci. Engng, 5, 331 (1959).
3. D. Gwinn, W. Trenholme. IEEE Trans. Nucl. Sci., V-NS, 1 (1963).
4. Subramaniam, R. Vedam. Nucl. Sci. Engng, 13, 271 (1962).
5. R. Trinko, S. Hanauer. Trans. ANS, 8, 60 (1965).
6. L. Gasirowski, L. Labno. Nucleonika, XI, 175 (1966).
7. А. И. Лейпунский и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 215.

Расчет эффективности прерывистых регулирующих стержней

А. В. ВОРОНКОВ

УДК 621.039.51.515

Прерывистые регулирующие стержни довольно часто используются в реакторостроении. Многие реакторы имеют большие размеры по высоте и, чтобы избежать заклинивания стержней, их делают из нескольких шарнирно-соединенных звеньев.

В некоторых реакторах с недостаточно жесткой конструкцией заклинивание регулирующих стержней возможно даже при небольших размерах активной зоны. В этом случае стержни также целесообразно выполнять разрывными по высоте.