

Обозначения

R , V — радиус и объем отрывающегося пузыря; γ — показатель степени, равный в зависимости от $\text{Pr}'\text{Gr}$ 1/3 или 1/4; $C' = f(\text{Pr}'\text{Gr})$; Φ_0 — интеграл Лапласа; ζ_σ — коэффициент силы поверхностного натяжения [3]; ζ_R — коэффициент сопротивления пузыря, определяемый скоростью его роста [3]; h — высота микронеровностей; $\kappa = 0,4$;

$$R_* = \sqrt{\frac{\sigma}{q(\rho' - \rho'')}}; \quad f_* = a'R_*^{-2}; \quad \vartheta = \frac{\rho'a'^2}{\sigma R_*};$$

$$\text{Pe}_* = \frac{qR_*}{r\rho''a'}; \quad \text{Nu}_* = \frac{\alpha R_*}{\lambda'}; \quad \text{Ja} = \frac{c'\rho'\Delta T}{r\rho''};$$

$$\text{Ja}_s = \frac{c'\rho'T_s}{r\rho''}; \quad \text{Ja}_\beta = \frac{c'\rho'}{\beta r\rho''}; \quad \text{Re}_* = \frac{\text{Pe}_*}{\text{Pr}'};$$

$$N'_T = q^n n^{\frac{1-3\gamma}{2}} A^{3\gamma-1} v'^{-2\gamma} R_* \text{Pr}'^\gamma \text{Ja}_\beta^{-\gamma}; \quad N_T =$$

$$= \sqrt[3]{qR_*^3 \beta r\rho'' (v'\lambda')^{-1}}; \quad m = \frac{r\rho''}{p_s} \left(1 + \frac{\text{Ja}_s}{\text{Ja}}\right)^{-1};$$

ср — параметр, соответствующий средней высоте микронеровностей [3]. Остальные обозначения общепринятые.

Поступило в Редакцию 13/III 1970*
В окончательной редакции 23/XI 1970 г*

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. М., Машгиз, 1962.
2. C. Rallis, H. Sawurek. Intern. J. Heat Mass Transfer, 7, 1051 (1964).
3. В. Ф. Присняков. «Инж.-физ. ж.», 19, № 5, 912 (1970); ПМТФ, № 5, 143 (1970); «Атомная энергия», 29, 46 (1970).
4. W. Rohsenow. Trans. ASME, 74, 969 (1952).
5. Б. К. Аверин, Г. Н. Кружидин. «Изв. АН СССР. Отделение техн. наук», № 10, 131 (1955).
6. Д. А. Лабунцов. «Изв. АН СССР. Отделение техн. наук. Сер. «Энергетика и транспорт», № 1, 58 (1963).
7. Д. А. Лабунцов. «Теплоэнергетика», № 12, 19 (1959).
8. Н. Г. Стюшин, Л. М. Элинзон. «Инж.-физ. ж.», 16, № 1, 54 (1969).
9. В. И. Толубинский. «Изв. вузов. Энергетика», № 1, 15 (1959).
10. R. Gaertner. Trans. ASME, 84, № 1, 52 (1954).
11. R. Vachon et al. Trans. ASME, 90, № 2, 24 (1968).
12. A. Hutton, J. S. Hall. Proc. Third Int. Heat Transfer Conference (Chicago, 1966).

Применение термометров сопротивления в ядерных реакторах

Э. Я. ГОРОДЕЦКАЯ, А. И. КИЦ, В. Я. КОТЕЛЬМАН

УДК 621.039.564

Для измерения температуры в ядерных реакторах широко применяются термометры сопротивления. В работах [1–5] рассмотрено воздействие ядерного излучения на материалы, используемые для изготовления термометров сопротивления. В работе [4] исследовалось влияние облучения потоком быстрых нейтронов 10^{19} нейтр/см² на сопротивление платины, меди и никеля. Установлено, что в результате облучения удельное сопротивление платины увеличивается на 1% (при температуре 30° С), меди на 20% (при температуре 150° С) и никеля $\ll 1\%$ (при температуре 240° С).

Никелевые и платиновые термометры, подвергнутые облучению интегральным потоком быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{19}$ нейтр/см² при температуре 100° С [2], увеличили свое сопротивление и показали температуру соответственно на 3,7 и 2,6° С больше номинальной. В результате отжига, проведенного после снятия облучения, отклонение уменьшилось, однако полного восстановления градиуровки термометра не было достигнуто.

Неустранимые изменения, происходящие в термометрах сопротивления при облучении их тепловыми нейтронами, связаны с изменением химического состава материала теплочувствительного элемента. При этом разные материалы, применяемые для изготовления термометров сопротивления, изменяют свой состав в неодинаковой степени. Так, например в медной проволоке при облучении потоком $3,1 \cdot 10^{22}$ нейтр/см² количество меди уменьшилось на 10%, а при $6,2 \cdot 10^{22}$ нейтр/см² —

на 20%. При этом в первом случае образовалась около 5% никеля и 5% цинка, а во втором случае — 10% никеля и 10% цинка. В платиновой проволоке при облучении потоком $3,1 \cdot 10^{22}$ и $6,2 \cdot 10^{22}$ нейтр/см² количество платины уменьшалось приблизительно на 2 и 4% соответственно [3].

Расчеты величины изменения сопротивления термометров при облучении показали [5], что медные термометры сопротивления претерпевают изменения в 10 раз большие, чем платиновые и в 16 раз большие, чем никелевые, что достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. В этой же работе показано, что платиновые термометры сопротивления целесообразно применять при интегральных потоках тепловых нейтронов до 10^{22} нейтр/см² и температуре до 100° С.

Для исследования характеристик термометров сопротивления современных конструкций [6] при облучении было испытано 10 платиновых термометров сопротивления ($R_0 = 100$ ом, класс 2 ГОСТ 6651–59). Термометры сопротивления состояли из платиновой обмотки, помещенной в каналы керамического изолятора из спеченной окиси алюминия. Каналы с обмоткой засыпались порошком окиси алюминия и герметизировались газурью. Затем термометры помещались в защитный чехол из стали X18H9T и облучались потоком нейтронов $6 \cdot 10^{18}$ нейтр/см² с энергией $E > 1$ Мэв и $3 \cdot 10^{19}$ нейтр/см² с энергией $E < 0,4$ Мэв при температуре 280° С. Сопротивление термометра измерялось до и после облучения

при температуре $\sim 0^\circ \text{C}$ (R_0) с помощью моста постоянного тока МОД-49 класса 0,05. После облучения было обнаружено увеличение сопротивления (около 0,05%), находящееся в пределах допустимого отклонения от номинального значения для платиновых термометров сопротивления второго класса. Столь малое увеличение сопротивления термометра можно объяснить непрерывным отжигом теплочувствительного элемента, а также

Изменение сопротивления изоляции термометров *

Термометр	Сопротивление, изоляции, Мом		Термометр	Сопротивление изоляции, Мом	
	до облучения	после облучения		до облучения	после облучения
1	500	20	6	500	20
2	500	5	7	500	50
3	500	5	10	500	5
4	500	5			

* Допустимое по ГОСТу 6651-59 сопротивление равно 2 Мом при 20°C и влажности 98%.

тем, что при таких сравнительно небольших интегральных потоках тепловых нейтронов примесные атомы не образуются. Это также подтверждается результатами работы [3].

Одной из основных характеристик термометров сопротивления является сопротивление изоляции между теплочувствительным элементом и защитной оболочкой. Ядерное излучение, воздействия на изоляционные материалы, снижает их сопротивление. По данным работы [4], керамическая изоляция из окиси алюминия, облученная потоком быстрых нейтронов до $3,5 \cdot 10^{18}$ нейтр/см² ($E > 1 \text{ Мэв}$) при температуре 400°C , уменьшает свое сопротивление в 100 раз, с 10^{10} до 10^8 ом. Дальнейшее увеличение интегрального потока не приводит к уменьшению сопротивления изоляции. Нами были измерены величины сопротивления изоляции семи термометров

сопротивления, подвергнутых облучению потоком нейтронов $6 \cdot 10^{18}$ нейтр/см² ($E > 1 \text{ Мэв}$) и $3 \cdot 10^{19}$ нейтр/см² ($E < 0,4 \text{ Мэв}$). Результаты измерений приведены в таблице.

Проведенный анализ опубликованных данных и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Для измерения температуры в ядерных реакторах можно применять платиновые термометры сопротивления с керамической изоляцией из окиси алюминия.

2. Термометры сопротивления целесообразно применять при интегральных потоках тепловых и быстрых нейтронов до 10^{19} нейтр/см² и при температуре эксплуатации, обеспечивающей непрерывный отжиг, т. е. не ниже 280°C . Для изучения возможности применения термометров сопротивления при больших значениях интегральных потоков и меньших температурах эксплуатации необходимы дальнейшие исследования.

Поступило в Редакцию 20/III 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Н. Ф. Правдюк, А. Н. Иванов, К. П. Дубровин, «Атомная энергия», 25, 233 (1968).
- В. А. Кривцов, Г. И. Гушин, А. А. Фрактончикова. Теплофизика высоких температур, 4, 279 (1966).
- У. Е. Браунинг, К. Е. Миллер. Вычисленные изменения состава термопар под действием излучения. Сборник измерительных температур в объектах новой техники. Перевод с англ. под ред. А. Н. Гордова. М., «Мир», 1965.
- Дж. Ф. Кирхер, Р. Е. Боуман. Влияние облучения на материалы и элементы электронных схем. Перевод с англ. под ред. В. Н. Быкова и С. П. Соловьева. М., Атомиздат, 1967.
- C. R o s s. Comm. and Electronics, No. 61, 58 (1962).
- Термопары и термометры сопротивления. Сводный каталог. ОНТИПрибор. М., 1965.

Функция переходной области для бериллия и некоторые примеры ее использования

В. Н. БОГОМОЛОВ, Л. А. ЧЕРНОВ

УДК 621.039.5

Для некоторых практических задач (измерения интегральных характеристик спектра нейтронов в реакторе, измерения пространственных распределений резонансных нейтронов и т. д.) применяется метод описания спектра нейтронов в реакторах с небольшим отравлением по упрощенной модели, использующей довольно грубое предположение, что реальный спектр можно разделить на спектр Максвелла и спектр замедления $\sim 1/E$.

Связывающая их переходная часть спектра в области $(2-40) \text{ kT}$, где k — постоянная Больцмана, а T — температура нейтронов в $^\circ \text{K}$, как показано в работах [1-5], слабо зависит от температуры замедлителя, если выполняется условие $\Sigma_a(kT)/\xi \Sigma_s < 0,2$.

Тогда энергетическое распределение нейтронов можно представить в простом виде:

$$\Phi(E) = \frac{E}{(kT)^2} e^{-E/kT} + \lambda \frac{\Delta(E/kT)}{E}. \quad (1)$$

Здесь $\Delta(E/kT)$ — функция переходной области, а величину λ , характеризующую соотношение потоков тепловых и эпитепловых нейтронов, легко найти экспериментально [5]. Подробные выводы аналитического выражения для λ с использованием математического аппарата можно найти в литературе [1, 2].

Так как форма функции переходной области слабо зависит от температуры замедлителя [3], функцию $\Delta(E/kT)$ можно вычислить даже из одного экспери-