

ложены в реакторе таким образом, чтобы обеспечить как можно большую равномерность энерговыделения. При этом задавался непрерывный спектр начальных коэффициентов размножения кассет K_{∞}^0 , затем с учетом всех основных процессов, происходящих в реакторе, одногрупповым методом рассчитывалось энерговыделение в разных точках реактора и подбирались значения, соответствующие минимальному отклонению энерговыделений.

Таким образом, была получена очередность номеров ячеек, в которые надо помещать кассеты в порядке убывания размножающих свойств. Эту последовательность, постоянную для каждого реактора, можно получить путем подбора. В настоящее время авторами разрабатывается математический метод определения идеальной кривой, соответствующей малым отклонениям энерговыделения от среднего значения для цилиндрических реакторов.

Численные расчеты реактора ВВЭР-440 по программе БИПР-5 показали, что уже первая кампания с теми же кассетами может быть улучшена при применении

указанного алгоритма. На рисунке показано поведение коэффициентов неравномерности K_V и K_Q в течение кампании. Видно, что при использовании данного алгоритма коэффициенты неравномерности остаются меньше в течение всей кампании.

Следует отметить, что преимущества указанного способа сильнее скажутся при дальнейших перегрузках, когда размножающие свойства кассет имеют большой разброс. Таким образом, использование алгоритма при перегрузках энергетических реакторов разного типа позволит легко определить необходимое расположение топливных кассет.

Поступило в Редакцию 14/IX 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудик А. П. Оптимальное расположение ядерного горючего в реакторе. М., Атомиздат, 1974.
2. Рудик А. П. Ядерные реакторы и принцип максимума Понtryгина. М., Атомиздат, 1971.

УДК 536.532

Влияние конструкции термометра

на погрешность внутриреакторного измерения температур

КОРОТЕНКО М. Н., СЛЕСАРЕВСКИЙ С. О.

Внутреннее тепловыделение в элементах конструкции термо-электрических термометров (термопар) и термометров сопротивления, используемых при внутриреакторных измерениях, обуславливает появление дополнительных погрешностей, величина которых для термометров одинаковой градуировки зависит от конкретного конструктивного исполнения термометра. Необходимость анализа и учета этих специфических погрешностей показана в работах [1, 2].

В настоящей работе приводятся результаты соотношения на различных уровнях мощности реактора ВВР-М следующих типов серийно изготавливаемых термометров: хромель-копелевых термопар с изолированным рабочим спаев (рис. 1, а, б); хромель-алюминиевых термопар с неизолированным спаев (рис. 1, в, г); платиновых термометров сопротивления градуировки 21 ($R_0 = 46$ Ом, рис. 1, д).

Термометры рис. 1, б, в, г изготовлены из термошарового кабеля КТМС с изоляцией из спрессованного порошка MgO. В термометрах рис. 1, а, д в качестве изоляции используются бусы из Al_2O_3 .

Все термометры поочередно размещались на фиксированной высоте в одной и той же ячейке активной зоны реактора. Темпосъем осуществлялся непосредственно потоком теплоносителя первого контура реактора, температура которого T_f измерялась с помощью дополнительных хромель-копелевых микротермопар диаметром 0,2 мм, расположенных на расстоянии 1–2 мм от наружной стенки термометра. Для термометров рис. 1, а, д с помощью таких же микротермопар измерялась и температура наружной стенки термометра T_w . Градуировка термометров проводилась в диапазоне температур 0–100 °C с погрешностью $\pm 0,5$ град. Основные условия проведения эксперимента при $N = 10$ МВт следующие:

| | |
|---|---|
| Плотность потока тепловых нейтронов | $1,1 \cdot 10^{18}$ нейтр./ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ |
| Плотность потока быстрых нейтронов при $E > 1,15$ МэВ | $4,3 \cdot 10^{18}$ нейтр./ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ |
| Интенсивность γ -излучения | $4,0 \cdot 10^{18}$ МэВ/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ |
| Расход теплоносителя через активную зону | 1300 $\text{м}^3/\text{ч}$ |
| Скорость протекания | 2,5 м/с |
| Средняя температура теплоносителя | 55 °C |

При облучении разность между температурой чувствительного элемента термометра T_0 и температурой теплоносителя T_f определяется интенсивностью внутреннего тепловыделения q_v , возникающего в термометре вследствие поглощения γ -квантов и нейтронных взаимодействий, а также величиной полного термического сопротивления R_t цилиндрического термометра, состоящего из n слоев:

$$R_t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha d_{n+1}},$$

где λ_i — коэффициент теплопроводности; d_i — диаметр i -го слоя; α — коэффициент теплоотдачи.

Как видно из рис. 2, а, максимальная разность между температурой чувствительного элемента испытываемого термометра и температурой теплоносителя, измеренной с помощью дополнительных микротермопар, зарегистрирована для хромель-копелевых термопар (см. рис. 1, а), представляющих собой многослойную систему (термоэлектрод, керамика, воздушный зазор, корпус). Наличие воздушных зазоров с малым значением коэффициента λ увеличивает термическое сопротивление, что и приводит в реакторных условиях

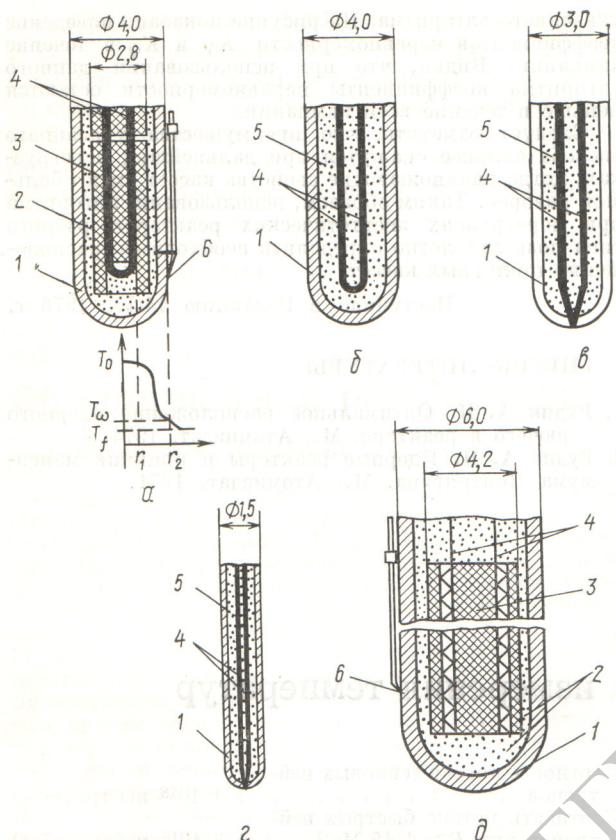


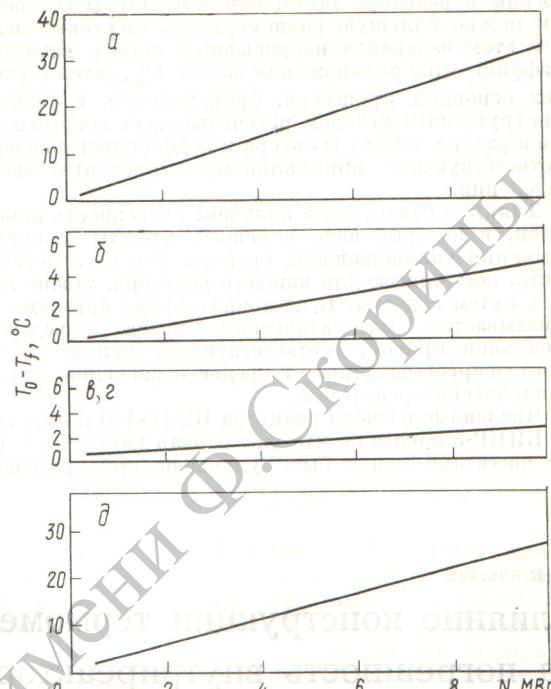
Рис. 1. Конструкции испытываемых термометров:

α — *γ* — термопары; *δ* — термометр сопротивления; 1 — корпус; 2 — порошок MgO ; 3 — бусы Al_2O_3 ; 4 — электроды; 5 — порошок Al_2O_3 ; 6 — дополнительная микротермопара

к значительному превышению температуры чувствительного элемента над температурой теплоносителя. Этим можно объяснить подобные результаты, полученные для термометров сопротивления (см. рис. 1, *δ* и 2, *δ*). Между показаниями отдельных термопар (см. рис. 1, *α*) наблюдаются значительные различия, достигающие 5—8 град при $N = 10 \text{ МВт}$, что вызвано, по-видимому, неидентичностью изготовления и сборки (в пределах соответствующих допусков) одноименных составных элементов термопар.

Уменьшение термического сопротивления у хромель-копелевых термопар кабельного типа (см. рис. 1, *β*) с равномерно уплотненным по всему объему порошком MgO обеспечивает при тех же основных размерах термопар значительно меньшую погрешность измерения температуры теплоносителя. Усредненные результаты измерения для термопар этого типа показаны на рис. 2, *β*. При минимальном термическом сопротивлении у хромель-алюмелевых термопар (см. рис. 1, *ε*, *ζ*) с неизолированным рабочим спаечем разность температур T_0 и T_f составляет 0,5—1,5 град (см. рис. 2, *ε*, *ζ*) и может быть обусловлена индивидуальными особенностями термопар и наличием градиента температур по диаметру ячейки.

Отличие θ температуры чувствительного элемента T_0 от температуры термометрируемой среды T_f при заданных энергетических характеристиках поля излучений

Рис. 2. Отличие температуры чувствительного элемента термометра T_0 от температуры теплоносителя T_f при различных уровнях мощности реактора

реактора и условиях охлаждения термометра может быть оценено аналитически с помощью известных уравнений теплопередачи [3]. Термометр представляет собой длинный цилиндр, в котором изменение температуры зависит только от радиальной координаты r (см. рис. 1, *α*) и на внешней поверхности теплообмен происходит по закону Ньютона. Разность температур $\theta = T_0 - T_f$ можно определить из уравнения

$$d^2\theta/dr^2 + d\theta/dr r = -q_v/\lambda$$

при граничных условиях $d\theta/dr \Big|_{r=r_1} = 0, -\lambda d\theta/dr \Big|_{r=r_2} = \alpha\theta$.

Как показали результаты экспериментального и аналитического исследования, при контактных измерениях температур в поле облучения конструкционные погрешности термометров могут достигать значительных величин. Для уменьшения этих погрешностей следует сочетать [2] снижение полного термического сопротивления термометра с одновременным снижением собственного тепловыделения термометра.

Поступило в Редакцию 20/IX 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Прозоров В. К., Лысиков Б. В., Васильев В. В. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Реакторостроение». Вып. 2. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1973, с. 59.
- Лысиков Б. В. и др. Температурные измерения в ядерных реакторах. М., Атомиздат, 1975.
- Исаченко В. П. и др. Теплопередача М., «Энергия», 1965.