

Измерение радиационного тепловыделения в конструкционных и замедляющих материалах на реакторе ИВВ-2

В. П. ГЕРАСИМЕНКО, Б. Н. ГОЩИЦКИЙ, В. В. ГУСЕВ, Л. В. КОНСТАНТИНОВ,
П. М. КОРОТОВСКИХ, С. К. СИДОРОВ, В. Г. ЧУДИНОВ

УДК 621.039.556

Мощность радиационного тепловыделения является исходной величиной при расчете температурных режимов и выборе систем тепло-схема в различных экспериментальных устройствах реактора [1]. Целью настоящей работы было измерение величины радиационного тепловыделения в различных конструкционных и замедляющих материалах, а также температуры радиационного разогрева замедляющих материалов для получения исходных данных по проектированию так называемых генераторов «холодных» и «горячих» нейтронов — специальных устройств, позволяющих сдвигать энергетический спектр тепловых нейтронов реактора в ту или иную сторону.

Предварительные расчеты тепловыделения от поглощения γ -излучения и замедления быстрых нейтронов проводились в предположении, что все γ -кванты, возникающие при делении, и запаздывающее γ -излучение осколков деления имеют одинаковую энергию $E_\gamma = 1 \text{ Мэв}$, а спектр быстрых нейтронов соответствует спектру нейтронов деления [2, 3]. Результаты расчетов показали, что величина радиационного тепловыделения в отражателе при номинальной мощности реактора 6 Мвт составляет примерно $1-2 \text{ вт/г}$.

Измерение тепловыделения такой величины можно осуществить с помощью калориметрических методов, которые являются достаточно точными и не требуют сложного экспериментального оборудования [4]. В качестве основного был выбран кинетический метод, заключающийся в измерении скорости разогрева и охлаждения исследуемого образца, помещаемого в специальный квазиadiaбатический калориметр. Такой метод уже применялся для измерения радиационного тепловыделения на реакторе ВВР [5]. При этом погрешность определения поглощенной энергии по начальному участку графика нарастания температуры образца без учета теплообмена с внешней средой составила примерно $5-10\%$. Это обстоятельство, очевидно, ограничивает применимость метода для измерения небольших (до $\sim 0,1 \text{ вт/г}$) величин радиационного тепловыделения. С другой стороны, с повышением мощности тепловыделения даже при хорошем тепловом контакте

между термопарой и материалом образца начинает сказываться локальный разогрев чехла термопары и ее спая, в результате которого регистрируемая температура практически не зависит от температуры образца, так как время установления теплового равновесия между образцом и термопарой сравнимо со временем измерения, составляющим примерно $5-15 \text{ сек}$ [6]. Таким образом, применимость кинетического метода для измерения больших (выше $3-5 \text{ вт/г}$) величин радиационного тепловыделения также ограничена (исключение составляют вещества с очень высокой теплопроводностью).

Для расширения интервала и повышения точности измерений квазиadiaбатическим калориметром были получены расчетные формулы теплового баланса в калориметре с учетом теплообмена с внешней средой, позволяющие проводить измерения небольших величин тепловыделения. Для непосредственного определения тепловыделения большой мощности была разработана методика измерений с помощью изотермического калориметра с кипением рабочей жидкости (воды).

Методика измерений и обработка экспериментальных данных. Для учета теплообмена квазиadiaбатического калориметра с внешней средой совместно решались нестационарные уравнения теплопроводности материала образца и наружной стенки калориметра в предположении [7] отсутствия градиентов температуры в калориметрической системе и стационарности источников тепловыделения. При хорошей теплоизоляции внутреннего контейнера с образцом и при хорошем теплоотводе с наружной стенки калориметра зависимость тепловыделения от температуры образца может быть записана в виде

$$\frac{1}{c\rho} \cdot q_V = \frac{K_{\lambda_s}}{c} \left[\frac{T - \bar{T}_H}{1 - e^{-\frac{K_{\lambda_s}}{c} t}} + T_H - T_{cp} - \frac{q_{ct}}{(c\rho)_{ct}} \cdot \frac{c_{ct}}{K_{ct}} \right], \quad (1)$$

где q_V , q_{ct} — удельная мощность тепловыделения в материалах образца и наружной стен-

ки калориметра; T , T_n — текущая (в момент времени t) и начальная температуры образца; $T_{ср}$ — температура окружающей среды; c , ρ , $c_{ст}$, $\rho_{ст}$ — удельная теплоемкость и плотность материалов образца и наружной стенки калориметра; K_{λ_s} , $K_{ст}$ — коэффициенты теплоотдачи образца и наружной стенки.

Темп охлаждения образца K_{λ_s}/c определяется из экспериментальной зависимости температуры образца от времени при остывании с помощью выражения

$$\lg \frac{T_0 - T_{ср}}{T - T_{ср}} = 0,434 \cdot \frac{K_{\lambda_s}}{c} \cdot t, \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура образца пе-

ред охлаждением. Величина $\frac{q_{ст}}{(c \cdot \rho)_{ст}} \cdot \frac{c_{ст}}{K_{ст}}$ определяет стационарную температуру разогрева наружной стенки калориметра, которая измеряется непосредственно на этой стенке.

Методика измерений больших тепловыделений изотермическим калориметром основана на определении времени выкипания t_0 известного количества G рабочей жидкости (воды), залитой во внутренний сосуд калориметра, изготовленный из материала исследуемого образца. Можно показать, что величина тепловыделения в образце связана с временем выкипания выражением

$$q_{V_0} \cdot V_0 = q_{G_0} \cdot G_0 = \frac{q_V G}{\rho [e^{r\rho} t_0 - 1]} + K_{\lambda_s}(T_K - T_{ср}), \quad (3)$$

где q_{V_0} , q_{G_0} — удельные объемная и весовая мощности тепловыделения в материале образца; V_0 , G_0 — объем и вес образца; q_V — удельная мощность тепловыделения в рабочей жидкости (воде); ρ , r , T_K — плотность, теплота испарения и температура кипения рабочей жидкости (воды); K_{λ_s} — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду с температурой $T_{ср}$, определяемый экспериментально по темпу охлаждения материала образца после выкипания рабочей жидкости в калориметре.

Для проведения измерений были изготовлены простые калориметры (рис. 1), в конструкции которых использовали небольшие количества слабоактивирующихся в потоке нейтронов материалов, что позволяло выполнять неоднократные измерения на номинальной мощности реактора. В квазиadiaбатическом калориметре исследуемый материал помещали во внутренний сосуд, а в изотермическом калориметре внутренний сосуд изготавливали из исследуемого материала с полым объемом внутри в виде конусообразной воронки, в которую заливали рабочую жидкость (вода). В последнем случае для разделения фаз при кипении жидкости использовали сепаратор пара. Для измерения температуры использовали хромель-алюмелевые термопары.

Градуировочные измерения с электрическими нагревателями известной мощности позволили оценить точность тепловых расчетов с помощью выражений (1) — (3), которая составила 2—3% для квазиadiaбатического калориметра с нижним пределом измерений около $0,001 \text{ вт/см}^3$ и 3—5% для изотермического калориметра с кипением (при $q_V = 0$) при подводимой к образцу тепловой мощности 50 вт и выше.

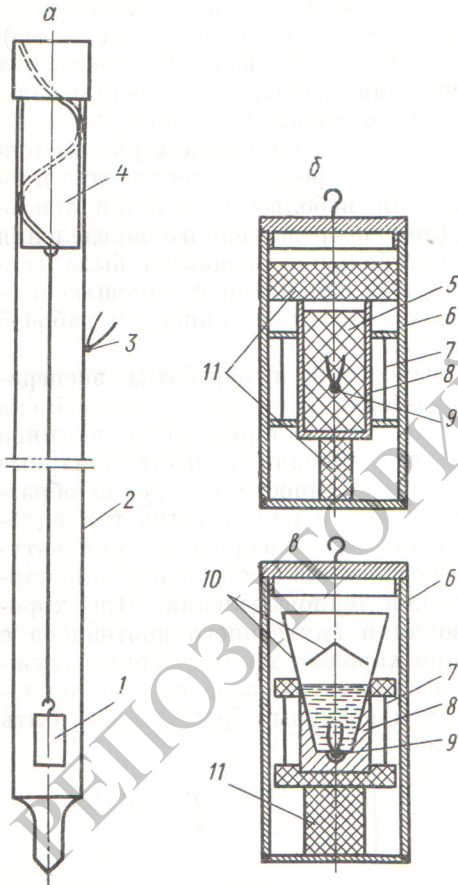
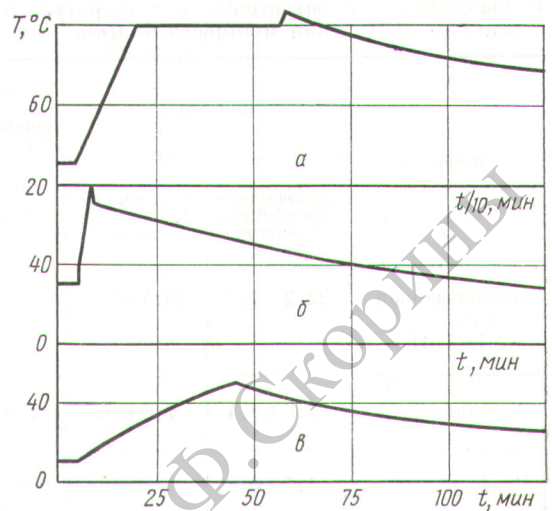


Рис. 1. Конструкция калориметров:

a — вертикальный канал; b — квазиadiaбатический калориметр; c — изотермический калориметр; 1 — калориметр в канале; 2 — канал; $3, 9$ — термопары; 4 — пробка; 5 — исследуемый материал; 6 — внешний корпус контейнера; 7 — алюминиевый экран толщиной $0,05 \text{ мм}$; 8 — внутренний цилиндр; 10 — паротбойник; 11 — теплоизоляционные опоры.

Описанные выше методики измерений и конструкции калориметров позволили проводить измерения на номинальной мощности реактора и тем самым исключить необходимость экстраполяции экспериментальных результатов. Для измерений использовали вертикальный экспериментальный канал диаметром 58 мм (см. рис. 1), который устанавливали в активную зону вместо штатной кассеты. В измерениях с помощью квазиadiaбатического калориметра температура образца регистрировалась потенциометром ЭПП-09. При 70—80° С калориметр поднимали в канале на 3—4 м над активной зоной, где радиационное тепловыделение пренебрежимо мало, и в этом положении измеряли зависимость температуры образца от времени при остывании. При измерениях с помощью изотермического калориметра время его пребывания в зоне облучения определялось выкипанием жидкости при постоянной температуре. Момент окончания выкипания фиксировали по резкому увеличению температуры образца, после чего калориметр поднимали в верхнюю часть канала, где регистрировалась зависимость температуры образца от времени при остывании. Типичные графики зависимости температуры образцов от времени при измерениях в различных точках активной зоны и отражателя на номинальной мощности реактора представлены на рис. 2. Аналогичные графики использовались для расчета тепловыделения по формулам (1) — (3).

Результаты измерений и обсуждение. Тепловыделение измерялось в наиболее характерных точках возможной установки экспериментальных устройств в области высоких потоков нейтронов: непосредственно в активной зоне, на границе активной зоны и отражателя, в отражателе за одним рядом бериллиевых кассет толщиной 64 мм, за рядом бериллиевых и рядом графитовых кассет общей толщиной 128 мм. При мощности реактора 6 Мвт измерения в отражателе выполнялись квазиadiaбатическим, а в активной зоне — изотермическим калориметрами. Для сопоставления результатов измерений квазиadiaбатическим и изотермическим калориметрами некоторые определения в активной зоне были выполнены кинетическим методом при мощности реактора 1 Мвт. Полученные при этом результаты линейно экстраполировались к мощности 6 Мвт и сравнивались с соответствующими данными изотермического метода. Результаты измерений тепловыделения в активной зоне и отражателе реактора представлены в таблице, в которой приведе-



Р и с. 2. Зависимость температуры образцов от времени: а — изотермический калориметр, активная зона; б — квазиadiaбатический калориметр, отражатель, большое тепловыделение (свыше 2 вт/см^2); в — то же, небольшое тепловыделение (до 2 вт/см^2).

ны также расчетные оценки тепловыделения для воды и алюминия, выполненные по методике работы [3]. В последнем столбце таблицы приведены значения стационарной температуры радиационного разогрева исследуемых материалов, помещенных в кварцевый сосуд Дьюара (без серебрения стенок). Эти данные необходимы для выяснения возможности использования радиационного разогрева некоторых материалов в генераторе «горячих» нейтронов. Достигнутые за счет радиационного разогрева стационарные температуры свидетельствуют о возможности использования такого разогрева для генератора «горячих» нейтронов с гидридом циркония в качестве термализатора. При использовании графита необходим дополнительный нагреватель или более эффективная теплоизоляция устройства.

При установке генератора «холодных» нейтронов в зону высоких потоков тепловых нейтронов важное значение имеет снижение тепловыделения в элементах конструкции и холодном замедлителе от поглощения γ -излучения. Это может быть достигнуто с помощью экранов из свинца. Однако толстые свинцовые экраны могут значительно изменить потоки тепловых нейтронов и уменьшить интенсивность «холодного» источника. С целью определения оптимальной толщины экрана были выполнены специальные измерения, результаты которых представлены на рис. 3 в виде

Радиационное тепловыделение и температура радиационного разогрева материалов в реакторе ИВВ-2 при мощности 6 Мвт

Материал	В активной зоне, $вт/см^3$		Квазиadiaбатический калориметр				Стационарная температура радиационного разогрева в отражателе за слоем бериллия толщиной 64 м.м, $^{\circ}C$
			в отражателе за слоем бериллия толщиной 64 м.м, $вт/см^3$		в отражателе за слоем бериллия и слоем графита толщиной по 64 м.м каждый, $вт/см^3$	на границе активной зоны и отражателя, $вт/см^3$	
	квазиadiaбатический калориметр	изотермический калориметр	измерено	рассчитано			
Нержавеющая сталь X18H10T	$22,2 \pm 1,1$	$19,4 \pm 1,0$	—	—	—	—	—
Алюминий	$7,6 \pm 0,4$	$7,8 \pm 0,4$	$1,20 \pm 0,06$	1,36	$1,05 \pm 0,05$	—	610
Графит	$4,5 \pm 0,8$	—	$0,87 \pm 0,05$	—	—	—	460
Вода	$4,8 \pm 0,25$	—	$0,89 \pm 0,05$	0,725	$0,67 \pm 0,03$	$1,77 \pm 0,09$	—
Гидрид циркония	—	—	$1,70 \pm 0,08$	—	—	—	550
Раствор борной кислоты, 40 г/л	$11,2 \pm 0,6$	—	—	—	—	—	—

графика зависимости относительной величины тепловыделения от толщины свинцового экрана для воды и алюминия. Как видно из рисун-

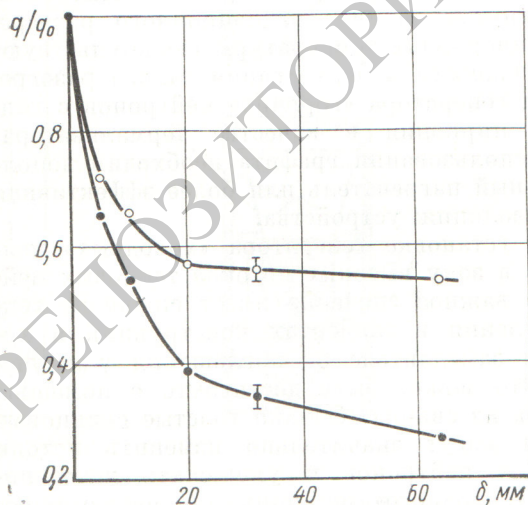


Рис. 3. Зависимость относительной величины радиационного тепловыделения q/q_0 от толщины свинцового экрана δ :

○ — вода; ● — алюминий.

ка, свинцовый экран толщиной 20 мм примерно вдвое снижает γ -компоненту тепловыделения в воде. Дальнейшее увеличение толщины экрана практически уже не снижает величину тепловыделения, поскольку она обусловлена замедлением быстрых нейтронов. Указанная толщина экрана, по-видимому, является оптимальной, так как снижение тепловыделения в алюминии (конструкционном материале) при таком экране оказывается также достаточно большим (примерно в 2,5 раза).

Как видно из расчетов и измеренных величин (см. таблицу), оценка радиационного тепловыделения, основанная на простых предположениях о спектре γ -квантов и быстрых нейтронов, позволяет определить эту величину в отражателе реактора с ошибкой в пределах 10—20% и вполне пригодна для ориентировочных расчетов. Можно показать, что с такой же погрешностью тепловыделение в отражателе пропорционально энергонапряженности активной зоны реактора. Поэтому полученные экспериментальные результаты с погрешностью 10—20% могут быть просто пересчитаны по энергонапряженности при изменении конфи-

гурации и мощности активной зоны. Измерения радиационного тепловыделения в активной зоне реактора при мощности 6 Мвт, выполненные изотермическим калориметром, в пределах 10—15% согласуются с результатами измерений с помощью квазиadiaбатического калориметра при мощности 1 Мвт (см. таблицу). По мнению авторов, это свидетельствует о возможности использования таких калориметров в реакторной дозиметрии для измерения радиационного тепловыделения выше 2—3 вт/г.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В. И. Зеленову за представленную возможность проведения измерений на реакторе, С. Г. Карпечко и В. И. Власову за организацию работ и подготовку экспериментального оборудования, М. С. Головановой, О. Е. Костинову и В. Д. Пархоменко за по-

мощь в проведении измерений и участие в обработке экспериментальных данных.

Поступила в Редакцию 1/VI 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Гольденблат, Н. А. Николаенко. Расчеты температурных напряжений в ядерных реакторах. М., Госатомиздат, 1962.
2. Г. Гольдштейн. Основы защиты реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
3. Биологическая защита ядерных реакторов. Справочник. М., Атомиздат, 1965.
4. В. М. Коляда, В. С. Карасев. «Атомная энергия», 21, 4 (1966).
5. Н. Ф. Правдюк, В. Н. Кузнецов, Н. И. Лалетин. «Атомная энергия», 9, 5 (1960).
6. Ю. И. Алексеенко и др. «Атомная энергия», 26, 4 (1969).
7. Б. Н. Олейник. Точная калориметрия. М., Стандартгиз, 1964.

Система автоматического пуска и регулирования мощности исследовательских реакторов

М. А. ХАСАН (Атомный центр, Каир, ОАР),

И. Г. СИСЕВИЧ (Институт физики АН УССР, Киев, СССР)

УДК 621.039.5

Условия работы исследовательских реакторов требуют частых пусков, остановок и изменений мощности. Эти операции желательно проводить с минимальной затратой времени, соблюдая условия безопасности работы с точки зрения ограничения периода разгона, а также других величин. В последнее время в литературе появились некоторые работы, посвященные этому вопросу [1, 2]. Характерная особенность работ — сложность их внедрения, невозможного без применения больших управляющих вычислительных машин. Для эксплуатации же необходима простая автоматическая система с обратной связью, которая была бы способна решить поставленные задачи. Далее описывается такая система, которая разработана на исследовательском реакторе типа ВВР-С в Аншасе (ОАР).

Для упрощения задачи воспользуемся следующими предположениями: температура воды в реакторе во время изменения мощности постоянна; запаздывающие нейтроны представляются одной усредненной группой.

Тогда можно записать уравнение нарастания мощности в таком виде [3]:

$$\dot{n} = \frac{\lambda\rho + u}{1 - \rho} n, \quad (1)$$

где n — поток нейтронов; λ — средняя константа распада источников запаздывающих ней-

тронов; ρ — реактивность; u — скорость изменения реактивности.

Если пренебречь постоянными времени сервоприводов регулирующих стержней, то уравнение изменения реактивности можно записать в виде

$$\dot{\rho} = u, \quad (2)$$

причем u пропорциональна напряжению на приводе стержней.

На основе выражения (1) можно записать уравнение периода реактора:

$$T = \frac{n}{\dot{n}} = \frac{1 - \rho}{\lambda\rho + u}. \quad (3)$$

Наложим на процесс управления следующие ограничения:

$$\begin{aligned} (-u_2 = -0,08) \leq u \leq (u_1 = 0,04) \beta/\text{сек}; \\ -20 \geq T \geq 30 \text{ сек}, \end{aligned}$$

где β — эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Требуется найти систему управления с минимальным значением

$$\int_0^{t_f} 1 dt,$$

где t_f — время процесса управления.