

Проведенное моделирование функционирования разработанного линейного индукционного ускорителя на активную нагрузку и полученные при этом параметры выходных двоярных разнополярных импульсов высокого напряжения показывают принципиальную возможность использования такого ускорителя, например, в качестве мощного импульсного источника питания диодных систем, работающих в двухимпульсном режиме и создающих

ионные пучки для технологических применений в области материаловедения. Высокая стабильность амплитудных и временных параметров выходных разнополярных импульсов, большая частота повторения двоярных импульсов и большой ресурс работы без профилактических мероприятий позволяет поднять качество технологического процесса, увеличить производительность и надежность установки при снижении эксплуатационных расходов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винтизенко И.И., Жерлицын А.Г., Рябчиков А.И., Юшков Ю.Г. Разработка релятивистских СВЧ генераторов в НИИ ядерной физики при ТПУ // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 101–105.
2. Меерович А.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. – М.: Сов. радио, 1968. – 476 с.
3. Ремнев Г.Е., Исаков И.Ф., Опекунов М.С., Матвиенко В.М. Источники мощных ионных пучков для практического применения // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 4. – Приложение. – С. 92–111.
4. Мащенко А.И. Оптимизация параметров линейного индукционного ускорителя с магнитной коммутацией энергии // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 10/2. – С. 82–85.
5. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – М.: Высш. школа, 1967. – 387 с.
6. Мащенко А.И. Линейный индукционный ускоритель с удвоением напряжения в выходном звене магнитного генератора // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/2. – С. 75–80.

Поступила 25.12.2012 г.

УДК 621.039.58: 532.529.5

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЬНЫХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК В ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА ИМПУЛЬСНОМ ГРАФИТОВОМ РЕАКТОРЕ

В.А. Витюк, А.Д. Вурим, И.В. Шаманин\*, С.Б. Козловский\*

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

\*Томский политехнический университет

E-mail: shiva@tpu.ru

Представлена расчетно-экспериментальная методика контроля энерговыделения в тепловыделяющих сборках при их испытаниях в центральном экспериментальном канале импульсного исследовательского ядерного реактора. Приведены результаты апробации методики в ходе выполнения серии испытаний с экспериментальным устройством, предназначенным для изучения поведения модельных тепловыделяющихборок реакторной установки типа ВВЭР-1000 в условиях, моделирующих заключительную фазу аварии с потерей теплоносителя.

#### Ключевые слова:

Импульсный исследовательский ядерный реактор, ядерное топливо, испытания, тепловыделение, контроль.

#### Key words:

Pulsed research nuclear reactor, nuclear fuel, test, heat emission, monitoring.

Имитационные испытания тепловыделяющихборок (ТВС) энергетических реакторов в исследовательских реакторах остаются одним из общепризнанных и надежных методов получения экспериментальной информации, используемой как для верификации существующих и разрабатываемых компьютерных кодов, описывающих поведение топлива энергетических реакторов в различных режимах, включая аварийные, так и для прямой экспериментальной оценки работоспособности ТВС.

Важной задачей при проведении таких исследований является определение энергетических параметров экспериментов (мощность и энерговыделение в топливе экспериментального устройства), которые необходимы как для правильной интерпре-

тации их результатов, так и для повышения точности реализации заданного энерговыделения. На исследовательских реакторах, обеспечивающих возможность реализации продолжительных стационарных режимов, определение энергетических параметров ТВС часто выполняется балансовыми методами, среди которых метод стационарного определения энерговыделения теоретически позволяет обеспечить точность до 1 %. При его применении в практике внутриреакторных исследований по данным [1, 2] точность определения энергетических параметров ТВС достигает значения 3...4 %.

Эксплуатационные возможности импульсного графитового реактора (ИГР) [3] позволяют реализовать исследования, направленные на получение

ние экспериментальной информации о быстропротекающих физических и тепловых процессах в ядерных реакторах, поведении топлива и конструкционных материалов активных зон ядерных энергетических установок в переходных и аварийных режимах [4]. Такие исследования, как правило, реализуются в импульсном режиме работы реактора, при котором в экспериментальном устройстве стационарный режим теплообмена не достигается. Это обстоятельство ограничивает возможность применения балансовых методов для тепловой калибровки экспериментальных устройств при подготовке и проведении испытаний на ИГР.

В настоящее время для решения задачи выбора параметров работы ИГР, необходимых для выполнения требований по реализации заданной мощности и интегрального энерговыделения в ТВС в имитационных испытаниях, применяется методика экспериментального измерения интегрального энерговыделения с использованием спектрометрических исследований мониторов энерговыделения и топливной композиции [5]. Для обеспечения возможности проведения таких исследований необходимо создание физического макета экспериментального устройства, в котором предусмотрена возможность извлечения топливной композиции. По результатам облучения макета ТВС устанавливается связь между измеренным значением и параметрами реактора в конкретном пуске. Основным недостатком такого подхода является то, что для его оперативного применения облучение топлива выполняется на относительно низком уровне энерговыделения в реакторе. Это означает, что может быть получена фактически одна экспериментальная точка (в самом начале диапазона ожидаемого энерговыделения) для проверки расчетных оценок величины мощности и энерговыделения реактора, которые необходимо реализовать при проведении имитационных испытаний.

Модельные ТВС поступают на испытания с достаточно развитой системой измерения теплофизических параметров, что позволяет рассмотреть возможность оценки энергетических характеристик ТВС в импульсных экспериментах по ее термическому состоянию. В работе представлен теплофизический метод определения энергетических параметров ТВС в импульсных исследованиях на ИГР, основанный на решении уравнений теплового баланса для квазирегулярного режима теплообмена, и результаты его применения в серии методических экспериментов. Основным преимуществом представленного метода является то, что оценка термического состояния ТВС может быть выполнена практически при любом режиме облучения, не приводящем к разрушению конструкции сборки и средств измерения термических параметров.

#### Обоснование метода

При проведении испытаний ТВС в импульсном режиме искомой характеристикой импульса явля-

ется пиковое значение мощности. Рассмотрим баланс тепла для элементарного объема  $v$  высотой  $\Delta z$  тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ), расположенного в окрестности некоторой произвольной точки между двумя перпендикулярными оси ТВС плоскостями. В общем виде

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m Q_i, \quad (1)$$

где  $m$  – количество конструкционных элементов;  $Q_{\Sigma}$  – суммарное количество теплоты, выделившегося в объеме топлива  $v_i$  за интервал времени  $\tau$ , Дж:

$$Q_{\Sigma} = \int_0^{\tau} \int_v q_v(\tau) dv d\tau,$$

$Q_i$  – количество теплоты, затраченное на разогрев  $i$ -го конструктивного элемента ТВС, Дж:

$$Q_i = \int_0^{\tau} \int_{v_i} \rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} dv_i d\tau,$$

где  $q_v$  – объемная плотность энерговыделения в топливе, Вт/м<sup>3</sup>;  $v_i$  – элементарный объем  $i$ -го элемента, м<sup>3</sup>;  $\rho_i$  – плотность материала  $i$ -го элемента, кг/м<sup>3</sup>;  $c_i$  – удельная теплоемкость материала  $i$ -го элемента, Дж/(кг·К),  $T_i$  – температура  $i$ -го элемента, К.

Объемная плотность энерговыделения в топливе может быть определена соотношением:

$$q_v(\tau) = K_r K_z \frac{N(\tau)}{V} = K_r K_z \frac{N_m}{V} n(\tau),$$

где  $K_r, K_z$  – значение радиального и высотного коэффициента неравномерности энерговыделения в рассматриваемом объеме;  $V$  – объем топлива в ТВС, м<sup>3</sup>;  $n(\tau)$  – безразмерная функция мощности,

$n(\tau) = \frac{N(\tau)}{N_m}$ ;  $N_m$  – «пиковое» значение мощности в импульсе, Вт. Вид функции  $n(\tau)$  известен по результатам эксперимента, при этом ее максимальное значение равно единице по условию нормировки.

Двойной интеграл, определяющий количество теплоты, затраченное на разогрев  $i$ -го элемента, можно преобразовать к выражению:

$$\int_0^{\tau} \int_{v_i} \rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} dv_i d\tau = \rho_i \bar{c}_i v_i (\bar{T}_i(\tau) - \bar{T}_i(0)) = \rho_i \bar{c}_i v_i \Delta \bar{T}_i,$$

где  $\bar{c}_i$  – средняя теплоемкость материала  $i$ -го элемента в интервале температур  $\bar{T}_i(0) \dots \bar{T}_i(\tau)$ , Дж/(кг·К);  $\bar{T}_i(0), \bar{T}_i(\tau)$  – среднemasсовая температура  $i$ -го элемента в момент времени  $\tau$ , К.

Формулу (1) преобразуем к виду:

$$K_r K_z \frac{N_m}{V} v_i \int_0^{\tau} n(\tau) d\tau = \rho_i \bar{c}_i v_i \Delta \bar{T}_i \left( \sum_{i=1}^m \frac{\rho_i \bar{c}_i v_i}{\rho_i \bar{c}_i v_i} \frac{\Delta \bar{T}_i}{\Delta \bar{T}_i} \right).$$

Выполнив замену  $v_i/v_1 = F_i/F_1$ , где  $F_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го элемента ТВС, для пикового значения мощности ТВС получим соотношение

$$N_m = \frac{m_1 \bar{c}_1 \Delta \bar{T}_1}{K_r K_z \int_0^\tau n(\tau) d\tau} \left( \sum_{i=1}^m \varphi_i \theta_i \right), \quad (2)$$

где  $m_1 = \rho_1 V_1$  – масса топлива в ТВС, кг;  $\varphi_i = \frac{\rho_i \bar{c}_i F_i}{\rho_1 \bar{c}_1 F_1}$  – относительная теплоемкость  $i$ -го элемента;  $\theta_i = \frac{\Delta \bar{T}_i}{\Delta \bar{T}_1}$  – относительная температура  $i$ -го элемента.

Если в некоторый момент времени  $\tau \theta \ll 1$  для  $i \geq 3$ , то расчет пикового значения мощности  $N_m$  можно проводить по первым двум слагаемым соотношения (2). При этом  $\Delta \bar{T}_1$  и  $\Delta \bar{T}_2$  следует определять по показаниям датчиков температуры (термопар), установленных в ТВЭЛ на одной высоте, т. е.

$$N_m = \frac{m_1 \bar{c}_1}{K_r K_z Y} (\Delta \bar{T}_1 + \varphi_2 \Delta \bar{T}_2). \quad (3)$$

В этом выражении  $Y$  – интеграл безразмерной мощности вспышки, равный

$$Y = \int_0^\tau n(\tau) d\tau = \int_0^\tau \frac{N(\tau)}{N_m} d\tau = \int_0^\tau \frac{I(\tau)}{I_m} d\tau,$$

где  $N(\tau)$  и  $N_m$  – текущее и максимальное значение мощности реактора, Вт;  $I(\tau)$  и  $I_m$  – текущее и максимальное значение показаний токовой камеры реактора, А.

Усреднив значения по каждой паре термопар, можно получить оценку пикового значения мощности:

$$\bar{N}_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n N_{mj},$$

где  $N_{mj}$  – рассчитанное по формуле (2) по показаниям  $j$ -й пары термопар значение, Вт;  $n$  – количество пар термопар.

Оценку суммарного энерговыделения в импульсе можно выполнить, используя формулу:

$$Q_\Sigma = N_m \int_0^\tau n(\tau) d\tau = \frac{m_1 \bar{c}_1 \Delta \bar{T}_1}{K_r^m K_z^m} (1 + \varphi_2 \theta_2). \quad (4)$$

При определении энергетических характеристик ТВС в импульсе по выражениям (3) и (4) не будут учтены составляющие, связанные с передачей теплоты от ТВЭЛ к окружающим конструкционным материалам и теплоносителю. Поэтому для оценки ошибки расчета необходимо оценить утечки теплоты от ТВС за время  $\tau$ .

#### Определение утечек тепла

В общем случае утечки тепла от ТВС будут определяться совокупностью всех видов теплообмена (теплопроводностью, конвекцией и излучением) ТВС с окружающей средой, зависеть от конструктивных особенностей экспериментального устройства и от режимов его испытаний. Рассмотрим некоторые типичные для методических исследований на ИГР случаи определения утечек теплоты от ТВС.

При наличии принудительного охлаждения утечки определяются количеством теплоты, затраченным на подогрев теплоносителя  $Q_{\text{тн}}$ , и количеством теплоты, затраченным на разогрев окружающих конструкционных элементов  $Q_{\text{ок}}$ :

$$Q_{\text{ут}} = Q_{\text{тн}} + Q_{\text{ок}},$$

где

$$Q_{\text{тн}} = \int_{t_0}^{t_{\text{max}}} N_{\text{тн}} dt,$$

здесь  $t_{\text{max}}$  – время, соответствующее моменту достижения максимального значения температуры топлива, с;  $t_0$  – время, соответствующее моменту начала реализации диаграммы энерговыделения в топливе, с;  $N$  – тепловая мощность, отводимая теплоносителем от ТВС, Вт:

$$N_{\text{тн}} = G C_p (T_{\text{вых}}(t) - T_{\text{вх}}),$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя через ТВС, кг/с;  $C_p$  – удельная массовая теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);  $T_{\text{вых}}(t)$  – температура теплоносителя на выходе из ТВС, в момент времени  $t$ , К;  $T_{\text{вх}}$  – температура теплоносителя на входе в ТВС, К.

Количество теплоты, затраченное на разогрев конструкционных элементов

$$Q_{\text{ок}} = \sum_{n=1}^k m_n c_{pn} \Delta T_n,$$

где  $m_n$  – масса  $n$ -го конструкционного элемента, кг;  $c_{pn}$  – удельная массовая теплоемкость  $n$ -го конструкционного элемента, Дж/(кг·К);  $\Delta T_n$  – изменение температуры  $n$ -го конструкционного элемента за время  $\tau$ , К;  $k$  – количество конструкционных элементов, контактирующих с теплоносителем.

В случае отсутствия принудительного охлаждения перенос теплоты от ТВС характеризуются, в основном, процессом конвективной теплоотдачи и тепловым излучением.

Конвективный теплообмен в условиях ограниченного замкнутого пространства и наличия восходящих и нисходящих потоков в устройстве может рассматриваться как элементарное явление теплопроводности, при этом вводится понятие эквивалентного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{эк}}$  газового зазора между ТВС и стенкой [6], формирующей полость для установки ТВС в устройство. Тогда величина утечек теплоты от ТВС будет определяться выражением:

$$Q_{\text{ут}} = \int_{t_0}^{t_{\text{max}}} \frac{\lambda_{\text{эк}}}{\delta} (T_{c1}(t) - T_{c2}(t)) S dt,$$

где  $S$  – площадь поверхности теплообмена между ТВС и стенкой, формирующей полость для установки ТВС, м<sup>2</sup>;  $T_{c1}(t)$  – температура поверхности ТВЭЛ в момент времени  $t$ , К;  $T_{c2}(t)$  – температура стенки, формирующей полость ТВС, в момент времени  $t$ , К.

Утечки тепла излучением от ТВС рассчитываются по формуле [7]:

$$Q_n = C_{1-2} \varphi F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где  $Q_n$  – количество теплоты, передаваемой в единицу времени, Вт;  $F$  – площадь поверхности излучения, м<sup>2</sup>;  $C_{1-2}$  – коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_1$  – температура поверхности более нагретого тела, К;  $T_2$  – температура поверхности менее нагретого тела, К;  $\varphi$  – угловой коэффициент.

**Погрешность определения пиковой мощности**

Погрешность расчета по формуле (3) определяется как погрешность функции нескольких переменных:

$$\sigma_N^2 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial N}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2, \quad (5)$$

где  $\partial N / \partial x_i$  – частная производная мощности по переменной  $x_i$ ;  $\sigma_{x_i}$  – погрешность измерения переменной  $x_i$ ;  $m$  – количество независимых переменных.

В соответствии с (5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial \Delta T_1} &= \frac{m_1 c_1}{K_r K_z Y} = \frac{N}{\Delta T_1 (1 + \varphi_2 \theta_2)}; \\ \frac{\partial N}{\partial K_r} &= -\frac{1}{K_r^2} \frac{m_1 c_1 \Delta \bar{T}_1}{K_z Y} (1 + \varphi_2 \theta_2) = -\frac{N}{K_r}; \\ \frac{\partial N}{\partial K_z} &= -\frac{1}{K_z^2} \frac{m_1 c_1 \Delta \bar{T}_1}{K_r Y} (1 + \varphi_2 \theta_2) = -\frac{N}{K_z}; \\ \frac{\partial N}{\partial Y} &= -\frac{1}{Y^2} \frac{m_1 c_1 \Delta \bar{T}_1}{K_r K_z} (1 + \varphi_2 \theta_2) = -\frac{N}{Y}; \\ \frac{\partial N}{\partial \Delta T_2} &= \frac{m_1 c_1 \varphi_2}{K_r K_z Y} = \frac{N \varphi_2}{\Delta T_1 (1 + \varphi_2 \theta_2)}. \end{aligned}$$

Относительная погрешность определяется выражением:

$$\varepsilon_N = \sqrt{\frac{\sigma_N^2}{N^2}} = \sqrt{\left[ \frac{\sigma_{\bar{T}_1(0)}^2 + \sigma_{\bar{T}_1(\tau)}^2}{\Delta \bar{T}_1^2 (1 + \varphi_2 \theta_2)^2} + \varepsilon_{K_r}^2 + \varepsilon_{K_z}^2 + \varepsilon_Y^2 + \frac{(\sigma_{\bar{T}_2(0)}^2 + \sigma_{\bar{T}_1(\tau)}^2) \varphi_2^2}{\Delta \bar{T}_1^2 (1 + \varphi_2 \theta_2)^2} \right]},$$

где  $\varepsilon_{K_r}$ ,  $\varepsilon_{K_z}$  и  $\varepsilon_Y$  – относительные погрешности определения величин  $K_r$ ,  $K_z$  и  $Y$ .

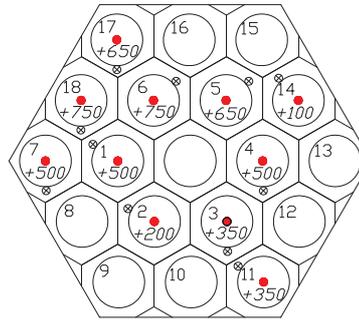
**Реализация метода**

Реализация теплофизического метода определения энергетических параметров модельных ТВС выполнялась в рамках серии методических испытаний с экспериментальным устройством, предназначенным для изучения поведения модельных ТВС типа ВВЭР-1000 в условиях, моделирующих заключительную фазу аварии с потерей теплоносителя.

Основным элементом устройства являлась сборка из 18 ТВЭЛ типа ВВЭР-1000 с длиной ак-

тивной части 800 мм. ТВЭЛ располагались по равносторонней треугольной решетке с шагом 12,75 мм. Сборка ТВЭЛ имела одну опорную и четыре дистанционирующие решетки и заключалась в шестигранный чехол, окруженный теплоизоляцией для уменьшения утечек тепла и выравнивания поля температуры по сечению ТВС. Охлаждение ТВС осуществлялось гелием и водяным паром.

Для измерения температуры ТВС были использованы одиннадцать пар термомпар типа ВР, установленных в центре топливных таблеток и на оболочках ТВЭЛ (рис. 1). Кроме того, регистрировалась температура на входе и выходе тракта охлаждения ТВС и температура поверхности чехла ТВС.



- 1...18 – номер ТВЭЛ
- +100...+750 – уровень установки ТЭП в ТВЭЛ
- – ТЭП в топливе
- ⊗ – ТЭП на оболочке

Рис. 1. Схема расстановки термомпар (ТЭП) в ТВС

Радиально азимутальный и высотный коэффициенты неравномерности энерговыделения ( $K_r$  и  $K_z$ ) по объему ТВС в точках установки ТЭП были определены в процессе предварительных физических исследований с макетом устройства (рис. 2).

В рамках методической серии на ИГР были проведены три импульсных эксперимента (табл. 1).

Таблица 1. Основные параметры ИГР при проведении экспериментов

Номер эксперимента	Режим работы реактора	Энерговыделение в активной зоне реактора, МДж
1	импульс	43
2		81
3		105

Результаты измерения температуры ТВЭЛ (в первом и втором экспериментах начальная температура ТВЭЛ составляла  $T_{0,1}=T_{0,2}=19$  °С) и определения энергетических характеристик ТВС в экспериментах теплофизическим методом приведены в табл. 2 с указанием стандартного отклонения среднего для соответствующего количества измерений. Для удобства значения температур в табл. 2 приведены в градусах Цельсия.

В табл. 3 приведены основные составляющие и общая погрешность расчета пиковой мощности в экспериментах по выражению (3).

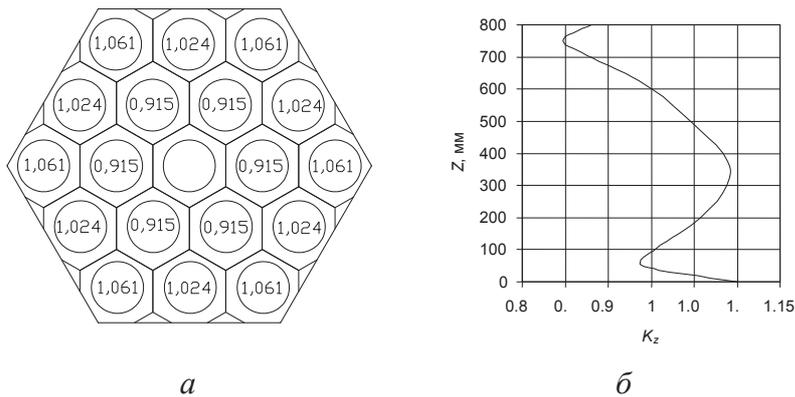


Рис. 2. Распределение энерговыделения в ТВС (в относительных единицах): а) радиально-азимутальное ( $K_r$ ); б) высотное ( $K_z$ )

Таблица 2. Результаты расчета суммарного энерговыделения и мощности ТВС

Номер эксперимента					1			2			3				
$i$	№ ТВЭЛ	$k_r$	$z$ , мм	$k_z$	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$Q_{ТВС}$ , кДж	$T_1$ , °C	$T_2$ , °C	$Q_{ТВС}$ , кДж	$T_{0,1}$ , °C	$T_1$ , °C	$T_{0,2}$ , °C	$T_2$ , °C	$Q_{ТВС}$ , кДж
1	2	0,915	200	1,057	265	169	496	470	344	945	122	637	125	604	1134
2	14	1,024	200	1,057	273	147	445	507	310	877	115	707	106	492	1081
3	3	0,915	350	1,092	277	248	537	486	453	993	124	689	118	653	1161
4	11	1,061	350	1,092	291	254	485	520	473	914	116	695	112	670	1031
5	1	0,915	500	1,046	255	251	523	451	446	971	126	695	122	643	1262
6	4	0,915	500	1,046	235	210	468	424	404	893	119	671	110	522	991
7	7	1,061	500	1,046	291	250	505	513	453	935	118	672	113	644	1070
8	5	0,915	650	0,969	249	241	548	445	442	1035	118	634	121	632	1256
9	17	1,061	650	0,969	275	236	513	484	426	949	119	677	123	613	1152
10	6	0,915	750	0,897	220	220	521	396	406	996	122	588	120	584	1227
11	18	1,024	750	0,897	235	227	497	420	410	937	119	597	119	568	1110
Количество тепла, затраченное на разогрев ТВЭЛ, кДж					504±9			950±15			1134±30				
Количество тепла, кДж, затраченное на разогрев (утечки тепла от ТВС):															
теплоносителя					гелий 18			гелий 36			водяной пар 9				
шестигранного чехла ТВС					10			19			15				
головок ТВЭЛ					6			13			5				
дистанционирующих решеток					6,7			13,5			5,4				
Энерговыделение в ТВС, кДж					545±11			1030±18			1168±30				
Максимальная (пиковая) мощность ТВС, кВт					530±11			1065±18			44±1				

Таблица 3. Составляющие и суммарная погрешность расчета пиковой мощности

Параметр	Значение, %
Погрешность измерения температуры топлива и оболочек ТВЭЛ ( $\varepsilon_T$ )	0,8
Погрешность определения коэффициентов радиального и высотного коэффициента неравномерности энерговыделения по объему ТВС ( $\varepsilon_{k_r}, \varepsilon_{k_z}$ )	3
Погрешность показаний ионизационных камер реактора ( $\varepsilon_V$ )	2,5
Суммарная погрешность расчета пиковой мощности ( $\varepsilon_N$ )	4,4

### Выводы

Представленные основы теплофизического метода позволяют установить зависимости, необходимые для расчета энергетических характеристик модельных ТВС при проведении импульсных испытаний на реакторе ИГР.

Теплофизический метод реализован в серии из трех импульсных реакторных экспериментов. Продемонстрировано, что энергетические характеристики ТВС в импульсных испытаниях могут быть определены с использованием результатов измерений теплофизических параметров, при этом погрешность расчета искомой характеристики импульса – пиковой мощности ТВС, не превышает 4,5 % (без учета тепловых потерь).

На момент окончания импульса мощности ТВС величина общих утечек тепла от ТВС составляет менее 8 % от суммарного энерговыделения, следовательно, ошибка определения пикового значения мощности для реализованных импульсов не превышает 8 % и может быть уменьшена путем улучшения теплоизоляции или вакуумирования полости ТВС на время эксперимента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vermeeren L. et al. Qualification of the on-line power determination of fuel elements in irradiation devices in the BR2 reactor: Scientific Report / Belgian Nuclear Research Centre. – Mol, Belgium, 2005. – NT.57 /D089023/01/LV.
2. Методика расчета тепловой мощности твэлов в экспериментальных каналах водяных петель реактора МИР.М1 / НИИАР; разработ. А.Л. Ижутов, Н.П. Матвеев, В.А. Овчинников. – Демитровград, 1995. – Рег. № 41-95. – 0229804912.
3. Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежал Н.А. Импульсный графитовый реактор ИГР // Атомная энергия. – 1964. – Т. 17. – № 6. – С. 463–474.
4. Васильев Ю.С., Вурим А.Д., Колодешников А.А., Алейников Ю.В., Бакланов В.В., Витюк В.А., Гайдайчук В.А., Гановичев Д.А., Жданов В.С., Зуев В.А., Игнашев В.И., Козловский Е.В., Микиша А.В., Пахниц А.В., Пешехонов С.Н., Прозорова И.В., Тарасенко Е.В. Исследования процессов, сопро-

Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований позволяют утверждать, что применение теплофизического метода позволит усовершенствовать существующую процедуру выбора параметров работы ИГР, необходимых для выполнения требований по реализации заданной мощности и интегрального энерговыделения в ТВС.

5. вожающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны // В кн.: Экспериментальные исследования в области безопасности атомной энергии. – Курчатов: Национальный ядерный центр РК, 2010. – С. 225–263.
5. Определение энерговыделения в топливных детекторах гамма-спектрометрическим методом при проведении испытаний на реакторе ИГР / ДПП ИАЭ РГП НЯЦ РК; разработ. М.О. Токтаганов, Ю.А. Попов и др. – АК.65000.00.728 МУ. – инв. № К-38051. – Курчатов, 2001. – 16 с.
6. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
7. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник / пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

Поступила 21.01.2013 г.

УДК 536.2:536.33

## ЛАЗЕРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ

Е.Ю. Морозова, В.М. Лисицын, В.П. Ципилев, А.Н. Яковлев

Томский политехнический университет  
E-mail: morozova@tpu.ru

*Рассмотрена задача импульсного лазерного нагрева двухслойной системы, в которой первый слой является прозрачным по отношению к воздействию потока, а второй – сильнопоглощающим. Методом численного моделирования получены температурные профили нагрева двухслойной системы при различных длительностях воздействующего импульса. Показано, что положение максимума нагрева не соответствует границе раздела сред. Полученные результаты использованы при анализе технологического процесса лазерного отслоения кристалла нитрида галлия от сапфировой подложки*

#### Ключевые слова:

*Лазерный нагрев, двухслойная система, численное моделирование.*

#### Key words:

*Laser heating, double-layer system, numerical simulation.*

#### Введение

Разработка высокоэффективных светодиодов является основным направлением совершенствования источников света. Одним из этапов технологической цепочки изготовления светодиодов является удаление полупроводниковой пленки с диэлектрической подложки, например, отделение кристалла нитрида галлия от сапфировой подложки.

В настоящее время перспективным методом отделения пленки нитрида галлия (GaN) от сапфировой подложки ( $Al_2O_3$ ) является метод, основанный

на быстром нагреве поверхностного слоя GaN лазерным излучением в области собственного поглощения, приводящий к термическому разложению GaN на металлический Ga и  $N_2$ , что и обеспечивает отделение гетероструктуры от подложки [1]. Длина волны лазерного излучения (ЛИ) подбирается так, чтобы сапфировая подложка была прозрачной к воздействию излучению, а поглощение матрицы GaN было высоким. Как правило, толщина слоя GaN не превышает 10...12 мкм, поэтому для качественного отделения сапфировой подложки