

УДК 539.124.6

## **Расчетно-теоретические и экспериментальные методы определения температуры микротвэлов в экспериментах на ИЯР БИГР\***

*Представлены предварительные результаты расчетно-теоретического и экспериментального методов определения температуры микротвэлов в импульсных облучениях на ИЯР БИГР. Численное моделирование экспериментов с микротвэлами на исследовательском реакторе БИГР проводилось по программе SAFR. Экспериментальное измерение температуры поверхности образцов в ходе облучения проводилось бесконтактным пирометрическим методом. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.*

**В. А. Устиненко, В. Н. Богданов,  
В. В. Горбунов, Г. Г. Иванова,  
В. Ф. Колесов, М. И. Кувшинов,  
А. К. Лычагин, В. В. Сажнов,  
А. В. Сеницын, В. Н. Софронов,  
Н. А. Тесаловский, А. А. Тюпанов**

### *Введение*

К середине 1990-х годов отечественные и зарубежные достижения в технологии оборудования газовых турбин, высокоэффективных теплообменников и электромагнитных подшипников позволили считать реальной разработку проекта и создание реакторной установки, сочетающей безопасный модульный высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР) и систему преобразования энергии, реализующую высокоэффективный газотурбинный цикл Брайтона с КПД ~ 50 %. Эта концепция легла в основу международного проекта ГТ-МГР.

В качестве топлива рассматривается применение микротвэлов (МТ) [1]. Микротвэлы представляют собой частицы двуокиси урана сферической формы (керна), которые заключены в многослойную, высокотемпературную и очень прочную керамическую оболочку, способную эффективно удерживать продукты деления (рис. 1). Микротвэлы гомогенно распределяются в графитовой матрице, образуя топливный компакт цилиндрической формы.

При рассмотрении сценариев возможного развития аварий на ВТГР выделены две причины их возникновения:

– резкое введение в активную зону (АЗ) реактора значительной положительной реактивности, повышающее плотность потока нейтронов, энерговыделение и температуру твэлов;

– снижение или прекращение расхода теплоносителя для отвода тепла из активной зоны, приводящее непосредственно к росту температуры топлива.

Всплески температуры в ядрах микротвэлов могут приводить к их плавлению, к нежелательным химическим реакциям и к локальным термическим напряжениям, т. е. к порче и даже разрушению твэлов. Кроме того, эти всплески температуры в ядрах не приводят к температурному гашению реактивности в момент импульса делений, поскольку в уран-графитовых реакторах гашение реактивности осуществляется в результате разогрева графитовой матрицы, а не урана. Очевидно, что в целях обеспечения сохранности и работоспособности топлива, а также стабильности температурного гашения реактивности возникновение значительных всплесков температуры в ядрах микротвэлов, входящих в топливную композицию, должно быть исключено. Тем не менее процессы перегрева топлива и термического разрушения микротвэлов требуют пристального изучения.

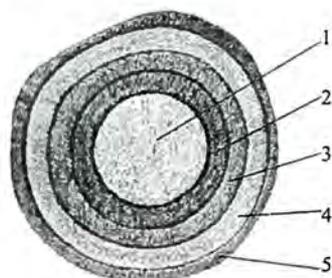


Рис. 1. Шлиф-разрез микротвэла: 1 – ядро; 2 – внутренний пористый слой (буферный) из пироуглерода; 3 – плотный внутренний слой из пироуглерода; 4 – промежуточный слой из карбида кремния; 5 – плотное наружное покрытие из пироуглерода

### **Постановка эксперимента и методология**

Целью данной работы являлась отработка расчетно-теоретического и экспериментального методов определения температуры микротвэлов в импульсных облучениях на ИЯР БИГР, моделирующих проектные и запроектные аварийные режимы реактора; в процессах реактивной аварии и ситуациях, связанных с частичной или полной потерей теплоносителя. Введение энергии в ядро микротвэла с последующим измерением значений энергии и температуры осуществлялось на базе облучательного комплекса ВНИИЭФ БИГР [2]. Для проведения облучения образцы помещались в стальной тигель, расположенный в вакуумной герметичной ампуле. В крышке ампулы были организованы оптический выход (герморазъем) и газовый разъем для вакуумирования объема ампулы. Для повышения числа делений в ядре за пуск реактора ампула с образцом окружалась полиэтиленовым замедлителем.

Полиэтиленовый блок с ампулой устанавливался в облучательной полости блока отражателя-замедлителя (БОЗ), который служит для увеличения нейтронного разогрева микротвэлов за счет роста потока нейтронов в области размещения облучаемых образцов и смягчения нейтронного спектра. БОЗ представляет собой графитовый блок прямоугольной формы (высота 700 мм, длина 700 мм, ширина 550 мм). Поверхность БОЗ, обращенная к активной зоне, представляет собой цилиндрическую поверхность, радиус кривизны которой (~ 512 мм) соответствует радиусу кривизны корпуса активной зоны. Облучательная полость расположена в области передней (обращенной к АЗ) поверхности БОЗ. Размеры полости 200×200×450 мм. Между АЗ и БОЗ располагался щит из карбида бора. Схемы размещения экспериментальной ампулы в БОЗ и БОЗ у боковой поверхности активной зоны представлены на рис. 2. Перемещение блока отражателя-замедлителя на облучательную позицию к АЗ осуществлялось дистанционно из пультового помещения. Измерение температуры поверхности образцов в ходе облучения проводилось бесконтактным методом с использованием световода – для передачи светового излучения от поверхности МТ к детекторам излучения [3]. Торцы световода организовывал светосбор с поверхности

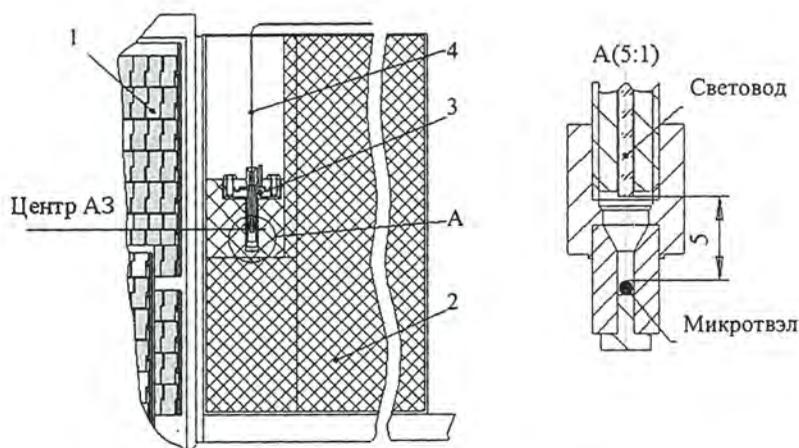


Рис. 2. Схемы размещения экспериментальной ампулы в БОЗ и БОЗ у боковой поверхности активной зоны: 1 – активная зона ИЯР БИГР; 2 – БОЗ; 3 – ампула с микровзлом; 4 – световод

образца микровзла в магистральный световод длиной 30 метров, выходящий через биологическую защиту ИЯР БИГР к измерительной аппаратуре.

Структурная схема измерительной системы представлена на рис. 3. Оптическое излучение разогретого в процессе облучения образца воспринимается входным торцом световода, расположенного в отверстии облучательной ампулы. Основой материала световода является двуокись кремния  $\text{SiO}_2$ , вещество химически нейтральное, в достаточной степени термостойкое. Температура плавления кварца составляет  $1700\text{--}1800\text{ }^\circ\text{C}$ . Оптическое излучение по волоконному световоду выводится из высокотемпературной зоны к фотоэлектрическому преобразователю. Техника передачи оптического излучения по световоду позволяет разделять световое излучение на несколько каналов и регистрировать в нескольких спектральных интервалах при помощи соответствующих фотоэлектрических преобразователей. Измерение соотношения интенсивностей излучения на различных длинах волн позволяет определять температуру среды. В качестве фотоприемников используются полупроводниковые фотодатчики корпорации "Oriel Instruments", USA (UV Enhanced Si Detector 71883 и Fused InGaAs Detector 71898).

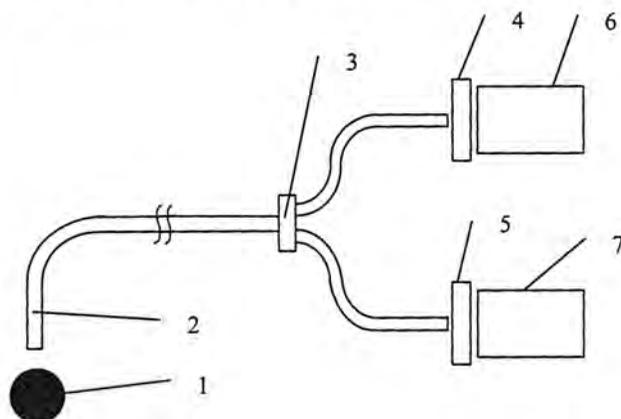


Рис. 3. Структурная схема пирометрической измерительной системы: 1 – микровзл; 2 – волоконный световод; 3 – волоконно-оптический разветвитель; 4, 5 – фильтр; 6, 7 – фотоприемники

С помощью монохроматора МДР-2 измерены их абсолютные спектральные чувствительности в интервалах длин волн от 0,4 до 1,8 мкм.

Для экспериментальной проработки вариантов измерительной системы был создан специальный измерительный стенд, включающий оптический аналог разогретого образца – светоизмерительная лампа СИ-6-100 (источник излучения типа А) с ленточным телом накаливания – и лабораторный блок питания RFT 3217. Лампа накаливания устанавливалась на оптической скамье.

Яркостная температура разогретого тела накаливания измерялась промышленным пирометром с исчезающей нитью "Проминь" в диапазоне от 800 до 2500 °С. На юстировочном столике к лампе подводился световод, обработанный торец которого организовывал светосбор с ленточного тела накаливания лампы в магистральный световод. В ходе калибровки с шагом 100 °С производились замеры сигналов с фотоприемников, которые относились к конкретной температуре, измеренной оптическим пирометром. По результатам измерений найден спектральный коэффициент  $K$ , определяемый отношением величины сигнала одного фотоприемника к величине сигнала второго ( $U_{Si\ Detector, B} / U_{InGaAs\ Detector, B}$ ) при конкретной температуре. Коэффициент  $K$  не зависит от затухания в магистральном световоде, от качества светосбора в торец световода, от расстояния до излучающего объекта, а характеризует лишь количественное изменение чувствительности к цветовому составу теплового излучения фотоприемников с различными спектральными характеристиками. Коэффициент  $K$  однозначно относится к температуре объекта. Экспериментально получена зависимость коэффициента  $K$  в диапазоне температур от 800 до 2500 °С ленточного тела накаливания светоизмерительной лампы СИ-6-100 (рис. 4). Для подтверждения истинности калибровочной кривой проведен лабораторный опыт с плавлением таблетки из стали типа 12Х в поле токов высокой частоты и дистанционным замером температуры разработанной методикой. Замеренная температура плавления образца составила 1550 °С при справочной 1540 °С.

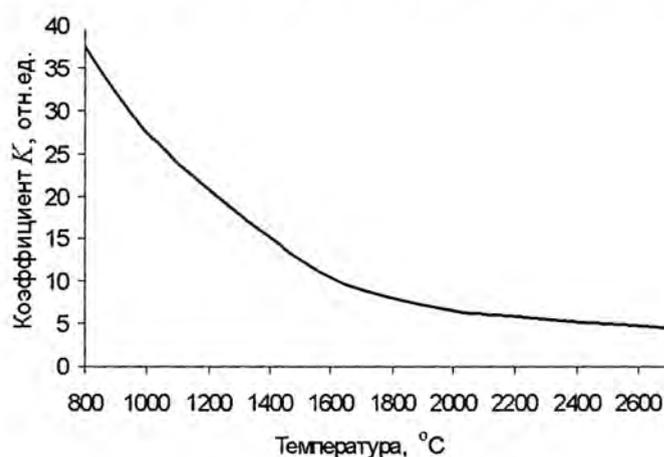


Рис. 4. Зависимость относительного спектрального коэффициента  $K$  от температуры образца

### Метод определения числа делений в образцах

Определение числа делений ядер урана в образцах проводилось по измерению  $\gamma$ -активности  $^{140}\text{La}$ , являющегося дочерним нуклидом по отношению к осколку деления  $^{140}\text{Ba}$ .

### Численное моделирование

Численное моделирование экспериментов с микротвэлами на исследовательском реакторе БИГР проводилось по программе SAFR [4]. Программа SAFR предназначена для описания поведения тепловыделяющих элементов вплоть до разрушения в экспериментах на исследовательских реакторах и в аварийных ситуациях на энергетических реакторах. Программа разработана в качестве блока расчета поведения топливных элементов в программе расчета теплогидравлики РАТВЭЛ. Затем она была развита и усовершенствована в рамках проекта МНТЦ № 614.

Основным отличием программы SAFR от существующих программ расчета поведения топливных элементов является более общий подход в описании термомеханических процессов. В программе используется метод численного моделирования динамики сплошной среды с учетом прочности, пластичности и теплопроводности. Система уравнений механики сплошной среды дополняется термодинамическими уравнениями состояния  $P = P(\rho, E)$   $E = E(\rho, T)$  и соотношениями Прандтля – Рейсса для девиатора напряжений. Для численного решения уравнений используется метод расщепления по физическим процессам.

Методика откалибрована по результатам ампульных и петлевых экспериментов на импульсных реакторах NSRR (Япония), БИГР и ИГР (Россия) для однофазного теплоносителя и малых скоростей его течения. Используемые уравнения состояния позволяют описывать тепловое расширение и фазовые превращения веществ. Для моделирования было выбрано два эксперимента с МТ, основные характеристики которых приведены в таблице.

Экспериментальная и расчетная информация

Номер опыта	1	2
Полуширина импульса $\Delta t$ , мс	2000	700
$E_{\text{БИГР}}$ , МДж	247	242
Диаметр МТ, мм	0,85–0,9	0,87–0,91
Масса МТ, мг, $\pm 0,2\%$ (до / после опыта)	1,21 / 1,13	1,28 / 1,28
Среда	Вакуум	Вакуум
Число делений в МТ, $\pm 8\%$	$2,58 \cdot 10^{11}$	$2,66 \cdot 10^{11}$
Энерговвод в МТ $E_{\text{жст}}$ , Дж, $\pm 10\%$	7,1	7,2
Максимальное значение температуры, К, $\pm 5\%$	2250	2800
Состояние после облучения	Целый	Целый
Энерговвод в МТ, использованный при моделировании $E_{\text{модель}}$ , Дж	6,5	6,5
Степень черноты поверхности МТ / тигля, использованная в расчетах	0,85 / 0,5	0,85 / 0,6

Математическая модель расчета основывается на следующих предположениях:

- тепловая схема проведения эксперимента (см. рис. 2) хорошо описывается одномерным уравнением теплопроводности;
- ядро имеет форму шара и окружено сферически-симметричными покрытиями;
- внутреннее покрытие из пористого пироуглерода не несет механической нагрузки и передает все перпендикулярные к своей поверхности напряжения непосредственно силовому покрытию из плотного пироуглерода;
- наличие тигля моделируется шаровой стенкой из стали 12Х18Н10Т с внутренним радиусом  $R_{T1} = 900$  мкм и внешним  $R_{T2} = 2000$  мкм.

Численное решение данной задачи проводится в сферической системе координат в одномерной постановке. При расчете для опыта № 1 принимались следующие параметры МТ:

- ядро:  $UO_2$ , диаметр 450 мкм, плотность  $10,6 \text{ г/см}^3$ , пористость 0,97, обогащение  $\approx 36 \%$ ;
- буферный слой из пироуглерода: толщина 80 мкм, плотность  $1,15 \text{ г/см}^3$ , пористость 0,6;
- первый силовой слой из плотного пироуглерода: толщина 50 мкм, плотность  $1,9 \text{ г/см}^3$ ;
- второй силовой слой из карбида кремния: толщина 40 мкм, плотность  $3,2 \text{ г/см}^3$ ;
- третий силовой слой из плотного пироуглерода: толщина 55 мкм, плотность  $1,9 \text{ г/см}^3$ .

Теплопроводность покрытий из пироуглерода в направлении, перпендикулярном поверхности осаждения, принималась в расчетах постоянной и равной  $\approx 10 \text{ Вт/(м·К)}$  [5]. Согласно технологии изготовления МТ допускаются небольшие отклонения размеров ядра и покрытий МТ от средних значений. Требования к плотности и геометрическим характеристикам топливных микросфер и покрытий приведены в работе [5]. Кроме того, допустимое значение коэффициента несферичности ( $D_{MAX}/D_{MIN}$ ) ядра МТ составляет не более 1,05 [1, 5]. При моделировании опытов предполагалось, что при отклонении массы микротвэла от номинальной величины (для опыта № 1) все размеры изменялись линейно с определенным коэффициентом подобия. Энерговыведение в реакции деления составляет  $\sim 200 \text{ МэВ}$  и складывается из мгновенной части (энергия осколков,  $\gamma$ -квантов, нейтронов) и запаздывающей ( $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение, запаздывающие нейтроны).

Мгновенное энерговыведение на один акт деления  $U$  в топливе МТ практически полностью определяется энергией осколков деления  $E_{оск}$ . Для оценок энерговыведения было взято значение  $170 \text{ МэВ}$  ( $\approx 3,6 \cdot 10^{10} \text{ дел./Дж}$ , см. таблицу). За счет запаздывающих нейтронов число делений в АЗ реактора и соответственно в топливе имитатора увеличивается в  $k = 1,13-1,14$  раза по сравнению с числом делений на конец регистрации ( $t \approx 160 \text{ мс}$ ) для импульса с полушириной  $t \approx 5 \text{ мс}$  и в  $1,12-1,13$  раза на конец регистрации ( $t \approx 850 \text{ мс}$ ) для импульса с полушириной  $t \approx 600 \text{ мс}$ . Поскольку активационный анализ проводился через несколько дней после проведения эксперимента, то для определения энерговывода в ядро МТ на конец регистрации импульса необходимо разделить полученное число на множитель  $k$ . В стандартных измерениях регистрация заканчивается при интенсивности импульса, составляющей  $\sim 3-6 \cdot 10^{-3}$  от максимальной. Так, в расчетах было принято, что для опыта № 1 (с полушириной импульса  $t \approx 2000 \text{ мс}$ ) этот множитель равен  $k = 1,08$ , а для опыта № 2 (с полушириной импульса  $t \approx 700 \text{ мс}$ )  $k = 1,11$ . Результаты численного моделирования опытов № 1 и № 2 приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

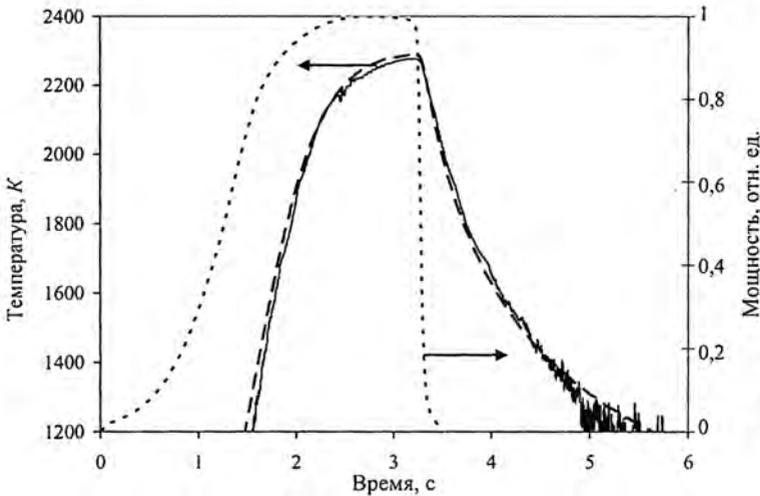


Рис. 5. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей температуры поверхности МТ от времени для опыта № 1. По вспомогательной оси отложены значения мощности энерговыведения в ядро МТ, нормированные на максимальное значение: — — эксперимент; ---- — расчет; - - - — мощность

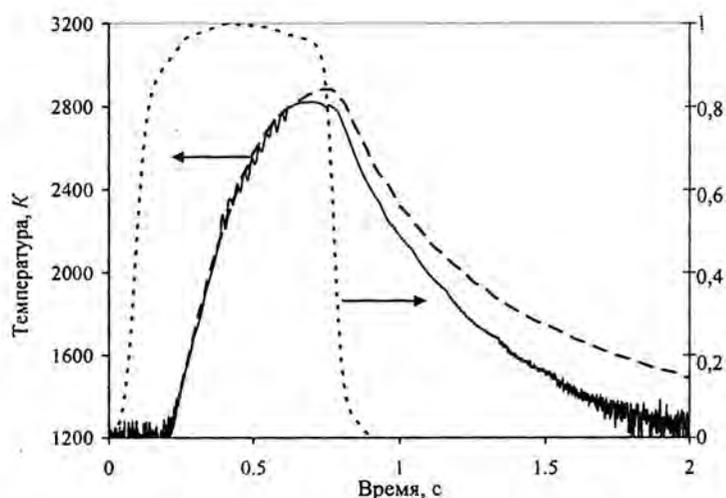


Рис. 6. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимости температуры поверхности МТ от времени для опыта № 2. По вспомогательной оси отложены значения мощности энерговыделения в ядре МТ, нормированные на максимальное значение: — — эксперимент; --- — расчет; -.-.- — мощность

Основные характеристики, использованные в расчетах, приведены в таблице. В расчетах вариацией множителя  $\xi$  эффективно учитывались несферичность поверхности МТ (см. рис. 1) и тепловое расширение материалов слоев МТ. Также в расчетах подбирались степени черноты излучающих поверхностей. Для поверхности МТ было выбрано значение 0,85, а для поверхности тигля 0,5–0,6 [6]. Столь высокое значение эффективной степени черноты поверхности тигля, использованное в одномерных расчетах, объясняется, в частности, тем, что он имеет достаточно сложную форму.

### Заключение

Расчеты показали, что экспериментальные данные описываются лучше при не очень высоких температурах ( $\approx 2000\text{--}2200\text{ К}$ ), в этих условиях слои МТ еще далеки от разрушения и деформации невелики. Так, для опыта № 1 экспериментальные и расчетные зависимости температур поверхности МТ хорошо согласуются друг с другом. При более высоких температурах МТ необходимо учитывать деформацию МТ, поэтому и совпадение с экспериментом оказывается немного хуже. Среднемассовая температура топлива отличается от температуры поверхности МТ на  $\approx 6\%$  для опыта № 1 (с полушириной импульса  $\Delta t \approx 2\text{ с}$ ) и на  $\approx 12\%$  для опыта № 2 (с полушириной импульса  $\Delta t \approx 0,7\text{ с}$ ) на момент максимального значения температуры поверхности МТ.

Из результатов расчетов следует, что использованное нами одномерное приближение является вполне пригодным для оценки температуры поверхности МТ. В дальнейшем в расчетно-теоретической части работы планируется исследовать и оценить влияние на результаты опытов таких факторов, как:

- наличие контактной теплопроводности в месте соприкосновения МТ и тигля;
- тепловое расширение материалов МТ;
- зависимость степени черноты поверхностей от температуры;
- наличие внутреннего давления СО внутри МТ в результате взаимодействия диоксида урана с углеродом  $\text{UO}_2 + 4\text{C} = \text{UC}_2 + 2\text{CO}\uparrow$ ;
- возможное испарение карбида кремния при высоких температурах (в диапазоне 2770–3070 К).

В экспериментах планируется провести исследования при различных величинах энерговывода и длительности облучения с вероятным доведением образцов МТ до разрушения с целью оценки допустимой границы работоспособности. Отработанный метод записи температуры образцов МТ позволит в дальнейших экспериментах при различных величинах энерговывода и длительности облучения фиксировать момент разрушения образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта МНТЦ № 3119.

### Список литературы

1. Черников А. С. Топливо и твэлы ВТГР // Атомная энергия. 1988. Т. 65. Вып. 1. С. 32–38.
2. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.
3. Температурные измерения. Справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина и др. Киев: Наук. думка, 1989.
4. Самигулин М. С., Воронова О. А., Иванова Г. Г., Софронов В. Н., Устиненко В. А. Программа РАТВЭЛ для численного моделирования аварий на ядерных энергетических установках // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997. Вып. 2. С. 24–33.
5. Черников А. С., Михайличенко Л. И., Орлов Г. В., Курбаков С. Д. Микротвэлы ВТГР. Свойства материалов покрытий и результаты предреакторных испытаний // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 3. С. 181–186.
6. Физические величины. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.

### **Calculated-Theoretical and Experimental Methods to Specify the Temperature of Micro Fuel Cells at BIGR Reactor Facility**

V. A. Ustinenko, V. N. Bogdanov, V. V. Gorbunov, G. G. Ivanova, V. F. Kolesov, M. I. Kuvshinov, A. K. Lychagin, V. V. Sazhnov, A. V. Sinitsyn, V. N. Sofronov, N. A. Tesalovsky, A. A. Tyupanov

*The preliminary results of calculated-theoretical and experimental methods, applied to specify the temperature of micro fuel cells involved into radiation experiments set up at BIGR reactor facility are presented. Numerical simulations of the experiments with micro cells at BIGR reactor were performed according to CAFR code. The temperature of the samples during radiation experiments was measured remotely using a pyrometric method. A good agreement between calculated and experimental results was found.*