

УДК 621.311.25(06)

Исследование контактных термических сопротивлений свинца в теплопроводящем подслое

**А.Б. Круглов, В.И. Рачков, И.Г. Меринов, В.С. Харитонов,
Л.П. Паредес**

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

E-mail: AVKruglov@mephi.ru

В статье представлены результаты измерений методом импульсного нагрева термических сопротивлений контактов жидкого свинца с керамикой Al_2O_3 и сталью в зазорах, моделирующих теплопроводящий жидкометаллический подслои в разрабатываемых ТВЭЛах быстрых реакторов нового поколения. Описана методика получения и обработки данных экспериментов, приведены результаты оценки погрешности измерений, исследована зависимость термических сопротивлений контактов жидкого свинца в модельных зазорах от температуры и количества плавлений и кристаллизаций свинца. По результатам экспериментов проведена оценка термического сопротивления теплопроводящего жидкометаллического подслоя в ТВЭЛах.

Ключевые слова: метод импульсного нагрева, термическое сопротивление контакта жидкого свинца со сталью и керамикой, теплопроводящий жидкометаллический подслой в ТВЭЛах.

Введение

Одним из технических решений, реализуемых в настоящее время для повышения безопасности и экономичности АЭС с быстрыми реакторами нового поколения, является переход от смешанного уран-плутониевого оксидного топлива к высокоплотному и высокотеплопроводному нитриднему топливу [1].

Проведенные исследования показали [2], что фактором, ограничивающим работоспособность тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) с нитридным топливом, является термомеханическое взаимодействие топлива и оболочки. Один из путей, исключающих это взаимодействие, предполагает использование в конструкции ТВЭЛа теплопроводящего жидкометаллического подслоя (ТЖМП) между топливом и оболочкой толщиной $\delta_{\text{тп}} = 0,25 - 0,5$ мм. При использовании ТЖМП вследствие снижения максимальной температуры топлива до значений, меньших 900°C [3], снижается распухание топлива с ростом выгорания и вызванное этим распуханием термомеханическое взаимодействие между топливом и оболочкой, а также уменьшается выход газообразных продуктов деления и их давление на оболочку, что позволяет обеспечить работоспособность ТВЭЛов при выгораниях, достигающих 15 % делящихся атомов [2].

Теплопередача через жидкометаллический теплопроводящий подслоя определяет-ся как термическим сопротивлением жидкого металла в зазоре между топливом и оболочкой, так и термическими сопротивлениями контактов жидкого металла с топливом и оболочкой. Причем при малой величине зазора между топливом и оболочкой влияние контактных термических сопротивлений на теплопередачу через жидкометаллический подслоя в ТВЭЛе может стать определяющим.

Анализ опубликованной литературы по рассматриваемому вопросу показал, что имеющаяся информация о термических сопротивлениях контактов жидких металлов с конструкционными сталями и топливом ТВЭЛов весьма ограничена. По-видимому, только в работах [4, 5] представлены результаты измерений термических сопротивлений контакта свинца, а также сплавов свинца с магнием и цирконием со сталями 12X18H10T и ЭП-823.

Величина термического сопротивления контакта жидкого металла и поверхности теплообмена определяется физико-химическим взаимодействием контактирующих сред, формирующим структуру теплового контакта. Сложность и многофакторность взаимодействия жидкого металла с поверхностями топлива и оболочки ограничивают возможность прогнозирования параметров структур тепловых контактов в ТВЭЛах с ТЖМП и расчетной оценки величин термических сопротивлений.

Информация о величинах контактных термических сопротивлений в ТВЭЛах с ТЖМП может быть получена в ходе проведения экспериментов на ТВЭЛах, проработавших в активной зоне [6]. Однако такие исследования потребуют значительных затрат на создание специальных установок, а также времени на их осуществление. Поэтому на сегодняшний день предпочтение для получения данных о контактных термических сопротивлениях в ТВЭЛах, необходимых для отработки технологии ТЖМП, отдается проведению экспериментов на моделях жидкометаллического подслоя в ТВЭЛах.

В настоящей работе представлены результаты исследования термического сопротивления контактов расплава свинца в измерительной ячейке из стали 12X18H10T и в ячейке с контактными поверхностями из стали ЭП-823 и керамики Al_2O_3 , моделирующей ТЖМП в ТВЭЛе с керамическим топливом. Измерения проводились в диапазоне рабочих температур ТВЭЛов в реакторах типа «БРЕСТ» 350–950 °С.

Методика измерений контактных термических сопротивлений

Измерения контактных термических сопротивлений свинца в ТЖМП выполнялись на установке LFA 457 Microflash методом импульсного лазерного нагрева [4, 5].

Модельный жидкометаллический подслоя создавался между доньшком и крышкой тигля измерительной ячейки установки (рис. 1а). В экспериментах использовались две измерительные ячейки. Ячейка из стали 12X18H10T применялась для выполнения тестовых измерений контактных термических сопротивлений с расплавом свинца, а также для оценки погрешности экспериментальной методики. Для моделирования ТЖМП в ТВЭЛе с керамическим топливом использовалась ячейка, в которой доньшко и обечайка крышки были изготовлены из стали ЭП-823, а плоскость крышки, контактирующая со свинцом, — из пластины Al_2O_3 толщиной 0,38 мм (далее ячейка ЭП-823 + Al_2O_3). Контакты расплава свинца с керамикой Al_2O_3 и сталью ЭП-823 имитировали соответственно термические сопротивления на границе жидкометаллического подслоя с топливом и оболочкой.

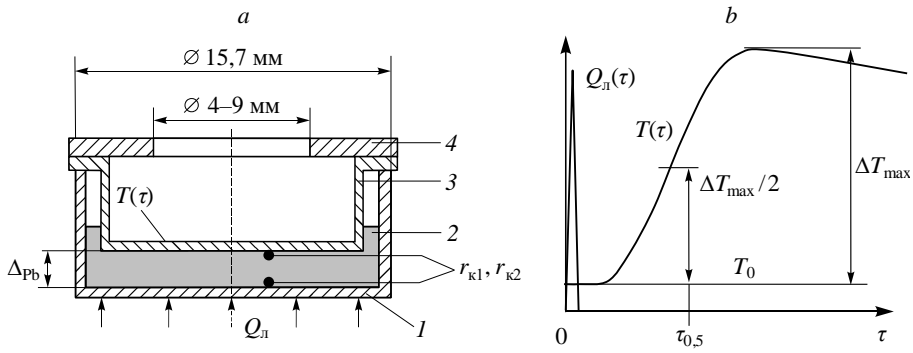


Рис. 1. Измерительная ячейка (а) и изменение температуры поверхности крышки при измерениях (б).

1–4 — соответственно доньшко, расплав, крышка и диафрагма;
 $r_{\text{тк1}}, r_{\text{тк2}}$ — термические сопротивления контактов расплава и поверхностей ячейки;
 размеры приведены в мм.

В исследовании выполнялись измерения нагрева нижней поверхности доньшка тигля измерительной ячейки импульсом энергии лазера $Q_{\text{л}}$ и регистрация во времени температуры $T(\tau)$ верхней поверхности крышки ячейки аппаратурой установки (рис. 1б).

В импульсном методе удобно использовать нормированные термограммы $\theta(\tau) = (T(\tau) - T_0)/\Delta T_{\text{max}}$, зависящие от параметров, которые определяют теплопередачу в измерительной ячейке. Так, можно записать, что

$$\theta(\tau) = \theta(\tau, T_0, \{l_i\}, \{\lambda_i, c_i, \rho_i\}, r_{\text{к1,2}}, \alpha, \{Q_{\text{л}}(\tau)\}), \quad (1)$$

где T_0 — начальная температура; $\{l_i\}, \{\lambda_i, c_i, \rho_i\}$ — геометрические и теплофизические параметры компонент ячейки; α — коэффициент теплоотдачи от поверхности ячейки в окружающую среду; $\{Q_{\text{л}}(\tau)\}$ — функция, описывающая форму и длительность импульса (0,3 мс) лазера установки LFA 457 Microflash; $r_{\text{к1,2}}$ — термические сопротивления контактов расплава свинца с поверхностями доньшка и крышки ячейки.

Исследуемые термические сопротивления определялись в процессе подгонки расчетной термограммы $\theta_{\text{р}}(\tau)$, получаемой с помощью численного решения в среде FlexPDE [7] краевой задачи теплопроводности, описывающей распространение теплового импульса в экспериментальной ячейке.

Экспериментальная ячейка моделировалась в двумерной постановке в цилиндрической геометрии. Расчетная область задачи представлена на рис. 2. На внешних поверхностях расчетной области учитывались потери тепла q_s от измерительной ячейки вследствие лучистого и конвективного теплообмена с элементами внутреннего объема установки, температура которых в условиях импульсного нагрева принималась равной исходной температуре T_0 (рис. 2):

$$q_s = \alpha(T_s - T_0), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, T_s — температура внешней поверхности расчетной области.

При моделировании теплопередачи в ячейке учитывались термические сопротивления $r_{\text{к1,2}}$ на границах контакта расплава с доньшком и крышкой. Возникающие при этом контактные разности температур определялись следующими соотношениями:

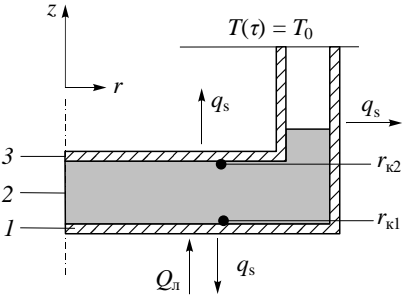


Рис. 2. Расчетная область задачи.
1–3 — соответственно доньшко, расплав и крышка.

$$\frac{T_1 - T_2}{r_{k1,2}} = -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial z} \right) = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial z} \right), \quad (3)$$

здесь T_1, T_2 — температуры контактирующих сред на границе контакта, $\lambda_{1,2}$ — коэффициенты теплопроводности контактирующих сред.

В расчетной модели использовались известные данные по плотности, теплопроводности и теплоемкости материалов измерительных ячеек и расплава свинца в диапазоне температур измерений [8–13].

Необходимые для выполнения расчетов теплофизические параметры пластины из Al_2O_3 — температуропроводность (a), теплоемкость (c), плотность (ρ) — были получены в диапазоне $300–650^\circ\text{C}$ в отдельных экспериментах. Так, температуропроводность и теплоемкость Al_2O_3 определялись с помощью установки LFA 457 Microflash. Плотность рассчитывалась по результатам измерений термического расширения пластины на dilatометре DIL-402 C и по значению плотности $\rho = 3,72 \text{ г/см}^3$, определенной при температуре $T = 20^\circ\text{C}$. Теплопроводность Al_2O_3 $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$ вычислялась на основе полученных данных по температуропроводности, теплоемкости и плотности. Относительные погрешности измерений ε_i теплофизических параметров пластины составили: $\Delta a/a = \pm 3\%$, $\Delta c/c = \pm 5\%$, $\Delta \lambda/\lambda = \pm 7\%$, $\Delta \rho/\rho = \pm 3\%$. Используемые в расчетной модели теплопередачи температурные зависимости $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$ в измерительной ячейке пластины из Al_2O_3 представлены в таблице.

Результаты расчетов показали, что полученные по рассматриваемой методике термограммы тепловых процессов в ячейке при равных значениях суммы контактных термических сопротивлений $r_{k1} + r_{k2}$, но при отличающихся значениях r_{k1} и r_{k2} , совпадают. Таким образом, по результатам экспериментов нельзя определить значения сопротивлений r_{k1} и r_{k2} по отдельности, но можно в полном соответствии с целью настоящей работы определить суммарное термическое сопротивление контактов модельного теплопроводящего подслоя $r_{\text{TK}} = r_{k1} + r_{k2}$. При проведении расчетов по численной модели процесса задавалось условие $r_{k1} = r_{k2} = r_{\text{TK}}/2 = r_k$.

Расчет величины r_k после предварительной подгонки термограммы $\theta_p(\tau)$ к $\theta_s(\tau)$ путем вариаций r_k и α выполнялся на начальном временном интервале $0,5 \cdot \tau_{0,5} \leq \tau \leq \tau_{0,5}$ термограммы нагрева поверхности крышки (рис. 1b), на котором чувствительность температур $\theta_s(\tau)$ и $\theta_p(\tau)$ к вариациям термического сопротивления r_k является максимальной, а влияние вариаций значений коэффициента теплоотдачи α мало. В качестве

Таблица
Теплофизические свойства пластины из Al_2O_3

$a(T) = (5,176 - 8,83 \cdot 10^{-3} T + 5,63 \cdot 10^{-6} T^2) \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	$300 \leq T \leq 650^\circ\text{C}$
$c(T) = 0,896 \cdot 10^2 + 0,788 \cdot T - 4,77 \cdot 10^{-4} T^2, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	
$\lambda(T) = 18,9 - 0,027 \cdot T + 1,55 \cdot 10^{-5} T^2, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	
$\rho(T) = 3,72 \cdot 10^3 - 8,48 \cdot 10^{-2} T, \text{ кг}/\text{м}^3$	$20 \leq T \leq 650^\circ\text{C}$

Рис. 3. Погрешности измерений r_k в ячейках 12X с зазором 0,3 (1) и 2 (2) мм.

результата измерений принималось значение r_k , обеспечивающее минимальное среднеквадратичное отклонение расчетных значений $\theta_p(\tau)$ от экспериментальной кривой на начальном участке термограммы.

Погрешность результатов измерений

В рассматриваемой методике результаты измерений r_k зависят от значений параметров в зависимости (1), используемых в численной модели теплопередачи в ячейке. Следовательно, можно записать, что

$$r_k = r_k(T(0), \{l_i\}, \{\lambda_i, c_i, \rho_i\}, \alpha, \{Q(r)\}). \quad (4)$$

Все перечисленные в (4) параметры $\{x_i\}$ являются независимыми, поэтому дисперсия σ_r^2 значений r_k записывается через дисперсии σ_i^2 этих параметров как

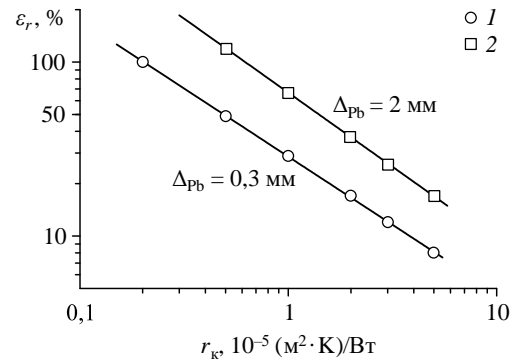
$$\sigma_r^2 = \sum \left(\frac{\partial r_{TK}}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2. \quad (5)$$

Доверительный интервал значений r_k при доверительной вероятности 0,95 рассчитывался как $\Delta r_k = 2\sigma_r$ [14], а относительная погрешность измерений $\varepsilon_r = \Delta r_k / r_k$. При проведении вычислений значения дисперсий параметров x_i , заимствованных из работ [8–13] и представленных с доверительной вероятностью 0,95, задавались соотношениями $\sigma_i = (\varepsilon_i x_i) / 2$, где ε_i — относительные погрешности измерений параметров x_i .

Расчеты погрешности измерений r_k между свинцом и сталью 12X18Н10Т в измерительных ячейках 12X с зазорами 0,3 и 2 мм при температурах 350, 650 и 800 °С для интервала значений $r_k = (0,2 - 5) \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$ показали, что зависимостью погрешности измерений от температуры можно пренебречь. Результаты расчетов при температуре 650 °С представлены на рис. 3. Видно, что в ячейках с зазором $\Delta_{pb} = 0,3$ мм с погрешностью не более, чем $\varepsilon_r = 30$ %, могут быть измерены термические сопротивления, значения которых превышают $1 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$. В ячейках с зазором $\Delta_{pb} = 2$ мм термические сопротивления, большие $1 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$, могут быть измерены с погрешностью менее чем 65 %.

Последовательность проведения измерений

Перед началом экспериментов выполнялась шлифовка ($R_z \leq 0,5$ мкм) внутренних поверхностей измерительной ячейки, промывка в кипящем ацетоне в ультразвуковой ванне деталей ячейки, сборка ячейки и ее размещение в рабочем объеме установки. Для каждой загрузки свинца контролировалась толщина зазора в ячейке до начала измерений и после их завершения.



Первое плавление загрузки свинца выполнялось в форвакууме ($p \approx 5$ Па), далее следовали нагрев ячейки до температуры $T = 400$ °С, запуск в объем установки аргона, нагрев с темпом 6 К/мин и стабилизация температуры ячейки на уровне 800–950 °С. При указанной температуре проводилась выдержка расплава продолжительностью от 30 до 60 минут. В процессе выдержки с использованием программного обеспечения установки LFA 457 Microflash для трехслойных образцов оценивалось изменение эффективной теплопроводности расплава в ячейке $\lambda_{эфф}$, таким образом контролировались уменьшение и стабилизация термического сопротивления контактов r_k на установившемся уровне при рассматриваемой температуре. После достижения установившихся значений термического сопротивления контактов расплава свинца с поверхностями ячейки начинались измерения r_k при охлаждениях и нагревах в диапазоне температур $T = 350$ –950 °С.

При измерениях с повторными плавлениями – кристаллизациями свинца измерительные ячейки до очередного плавления находились в атмосфере аргона.

Термическое сопротивление контакта расплава свинца при первом плавлении

В проведенных исследованиях было установлено, что при нагреве в диапазоне температур 350–950 °С наблюдается монотонное уменьшение величин термических сопротивлений контактов r_k , которые по истечении определенного промежутка времени достигают установившихся значений r_k^* . Отмеченные закономерности представлены на рис. 4 в виде результатов измерений r_k при последовательных изотермических выдержках при температурах $T = 700, 800, 850$ и 950 °С в цикле нагрева ячейки (1) до 950 °С и ее охлаждении (2) до 350 °С.

Промежуток времени τ_p , в течение которого происходит релаксация термических сопротивлений r_k к установившимся значениям r_k^* , уменьшается с ростом температуры. Так, при $T = 700$ °С $\tau_p \approx 5$ часов (рис. 5), а при температуре 950 °С (рис. 4) изменения r_k не наблюдалось, т.е. релаксация к установившимся значениям r_k^* произошла в процессе нагрева.

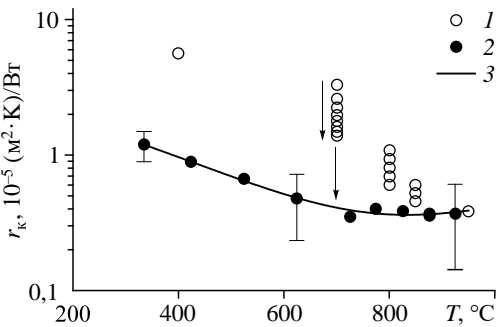


Рис. 4. Результаты изменений r_k в ячейке 12X с $\Delta r_b = 0,3$ мм.
Нагрев и изотермические выдержки (1), охлаждение (2); 3 — зависимость, интерполирующая установившиеся значения r_k^* .

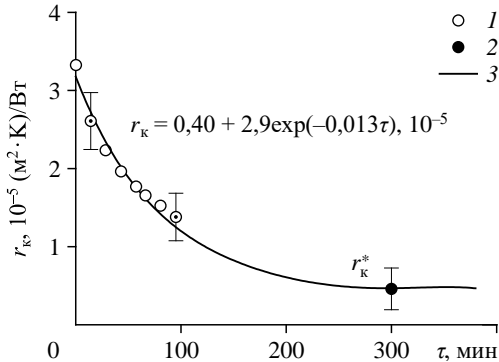


Рис. 5. Релаксация r_k при $T = 700$ °С.
1 — результаты измерений;
2 — значения r_k^* ;
3 — интерполирующая зависимость.

Рис. 6. Результаты измерений r_k^* в ячейках 12Х с $\Delta_{рб} = 2$ (1–6) и 0,3 (7) мм после плавления в вакууме.

Также было установлено, что термические сопротивления, измеренные после выдержки при $T_v = 800–950$ °С, при охлаждении до $T = 350$ °С и последующем нагреве до $T = 950$ °С совпадают в пределах $\pm (5–10)\%$. Это означает, что после высокотемпературной выдержки формируется структура теплового контакта расплава с теплопередающими поверхностями в измерительной ячейке, которая характеризуется установившимся значением термического сопротивления r_k^* .

Релаксацию термического сопротивления r_k можно связать с изменением структуры контакта расплава свинца с поверхностью ячейки при нагреве. Состояние теплопередающих поверхностей измерительных ячеек характеризуется наличием шероховатости, тонких оксидных пленок, а также прослоек адсорбированного на поверхности газа. Вследствие этого на одних участках расплав контактировал с тонким слоем окислов на поверхности стали, а на других — с прослойками газа, адсорбированного на поверхности. В ходе нагрева и изотермической выдержки в результате выхода адсорбированного газа во внешний объем установки через отверстия в обечайке ячейки (рис. 1) относительная площадь контактов с газовыми прослойками уменьшалась. Также при температурах свыше 650 °С периодически происходило разрушение оксидных пленок и локальное смачивание расплавом поверхности стали, из-за чего его термическое сопротивление контакта снижалось до установившихся при данной температуре значений r_k^* .

На рис. 6 представлены результаты измерений r_k^* в ячейке 12Х с толщинами слоя свинца $\Delta_{рб} = 2$ и 0,3 мм после первого плавления. Можно видеть, что наблюдавшиеся в этих экспериментах установившиеся значения термических сопротивлений r_k^* не превышали $2 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт.

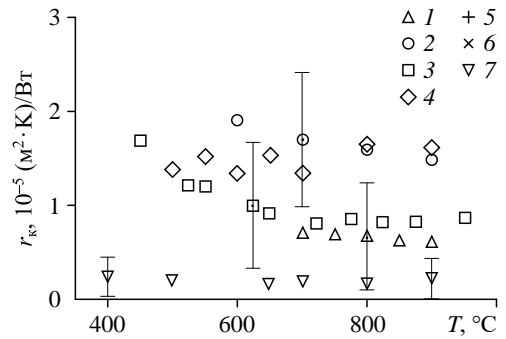
Термическое сопротивление контакта расплава свинца при повторных плавлениях и кристаллизациях

В работе [5] было установлено, что при повторных плавлениях свинца на сталях ЭП-823 и 12Х термические сопротивления контактов увеличивались и после пяти плавлений достигали значений $r_k^* \approx (0,5–1) \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт.

С целью выявления зависимости r_k^* от числа плавлений в экспериментах с ячейками 12Х было проведено семь плавлений при $\Delta_{рб} = 0,3$ мм и девять при $\Delta_{рб} = 2$ мм, а в ячейке ЭП-823 + Al₂O₃ — пять плавлений при $\Delta_{рб} = 0,3$ мм.

Первые плавления свинца проводились в форвакууме. Затем для формирования установившегося теплового контакта расплава ячейка 12Х нагревалась до температуры 900 °С, а ячейка ЭП-823 + Al₂O₃ — до 800 °С. Последующие плавления свинца и выдержки между плавлениями проводились в атмосфере аргона.

На рис. 7 представлены результаты измерений при $T = 650$ °С зависимости значений r_k^* в ячейках 12Х и ЭП-823 + Al₂O₃ от количества плавлений свинца. Полученные



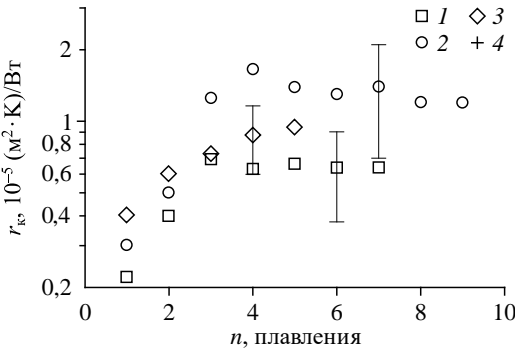


Рис. 7. Зависимость r_k^* при $T = 650^\circ\text{C}$ от количества плавлений в ячейках 12Х с $\Delta_{\text{Рб}} = 0,3$ (1) и 2 (2) мм, в ячейке ЭП-823 + Al_2O_3 с $\Delta_{\text{Рб}} = 0,3$ мм (3) и в ячейке из стали ЭП-823 с $\Delta_{\text{Рб}} = 2$ мм (4) [5].

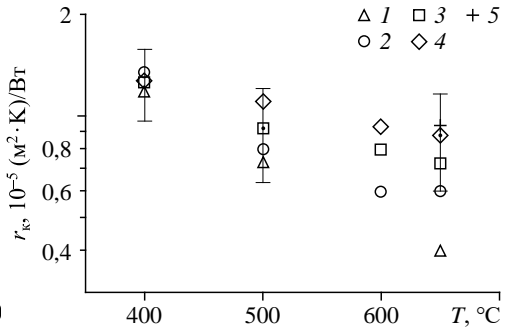


Рис. 8. Результаты измерений r_k^* в ячейке ЭП-823 + Al_2O_3 с $\Delta_{\text{Рб}} = 0,3$ мм для последовательностей плавлений №№ 1 – 5.

в работе данные показывают, что после четырех-пяти плавлений в аргоне термические сопротивления контактов уже не изменяются и составляют $r_k^* = (0,6 - 1,2) \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

На рис. 8 представлены результаты измерений r_k^* для последовательности плавлений свинца в ячейке ЭП-823 + Al_2O_3 в зависимости от температуры. Среднее значение термического сопротивления контакта r_k^* в интервале температур $400 - 650^\circ\text{C}$ составляет после пяти плавлений $1,0 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Термическое сопротивление ТЖМП

Термическое сопротивление ТЖМП $r_{\text{тп}}$ определяется толщиной подслоя $\delta_{\text{тп}}$ и коэффициентом теплопроводности жидкого металла в нем $\lambda_{\text{тп}}$, а также термическим сопротивлением $r_{\text{тк}}$ контактов подслоя с топливом и оболочкой:

$$r_{\text{тп}} = \frac{\delta_{\text{тп}}}{\lambda_{\text{тп}}} + r_{\text{тк}}. \quad (6)$$

Полученные в работе результаты позволяют оценить величину термического сопротивления свинцового теплопроводящего подслоя в ТВЭЛе. Принимая значения $\delta_{\text{Рб}} = 0,25$ мм, $T = 650^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{Рб}} = 20$ Вт/(м·К), $r_{\text{тк}} = 2r_k^* \approx 2 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$, получим

$$r_{\text{тп}} = 3,3 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}. \quad (7)$$

Можно заключить, что 60 % вклада в $r_{\text{тп}}$ составляют термические сопротивления контактов жидкого металла с поверхностями топлива и оболочки $r_{\text{тк}}$.

Заключение

В работе представлена методика измерения термических сопротивлений контактов расплава металла ТЖМП с теплоотдающими поверхностями в тонких зазорах, основанная на методе импульсного лазерного нагрева. Установлено, что погрешность измерений термических сопротивлений контактов снижается при уменьшении толщины слоя жидкого металла в зазоре.

Результаты измерений показали, что в характерном для работы жидкометаллического теплопроводящего подслоя интервале температур $400 - 650^\circ\text{C}$ величина терми-

ческого сопротивления контакта расплава свинца с теплоотдающими поверхностями может составлять $1 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$, что необходимо учитывать при анализе теплопередачи в ТВЭЛе.

Список литературы

1. Троянов В.М., Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Скупов М.В. Перспективы использования нитридного топлива в быстрых реакторах с замкнутым топливным циклом // Атомная энергия. 2014. Т. 117, вып. 2. С. 69–75.
2. Адамов Е.О., Забудько Л.М., Мочалов Ю.С., Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Крюков Ю.Н., Скупов М.Н. Разработка ТВЭЛа с нитридным уран-плутониевым топливом с жидкометаллическим подслоем // Атомная энергия. 2019. Т. 127, вып. 5. С. 255–262.
3. Orlov V.V., Smirnov V.S., Filin A.I., Sila-Novitsky A.G., Leonov V.N., Tsikunov V.S., Barinov S.V., Kogut V.A. Deterministic safety of the brest reactors // 11th Intern. Conf. on Nuclear Engng, Tokyo, Japan, April 20–23, 2003, ICONE11-36415. P. 1–9.
4. Kruglov A.B., Kruglov V.B., Struchalin P.G., Kharitonov V.S., Orlova E.A., Zagrebayev S.A., Zhmurin V.G. Thermal conductivity of Pb-Mg-Zr alloys and the thermal resistance of the interface between alloys and EP-823 steel in the temperature range of 300–900 °C // Bulletin of the Lebedev Physics Instit. 2016. Vol. 43, Iss. 10. P. 302–305.
5. Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С., Стручалин П.Г. Методика исследования термического сопротивления контакта жидкого металла и теплопередающей поверхности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. Вып. 4. С. 141–146.
6. Лешенко А.Ю., Кузьмин И.В. Определение теплофизических характеристик отработавших ТВЭЛов ВВЭР-1000 методом радиального нагрева // Сб. трудов ГНЦ РФ НИИАР, Димитровград, 2006. Вып. 1. С. 33–44.
7. Круглов А.Б., Рачков В.И., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Паредес Л.П. Теплопроводность свинца в диапазоне температур 350–1000 °C // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 4. С. 647–654.
8. Bobkov V.P., Fokin L.R., Petrov E.E., Popov V.V., Rumiantsev V.N., Savvatimsky A.I. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data, IAEA / Ed. P.L. Kirillov. Vienna, 2008. 191 p.
9. Sobolev V. Database of thermophysical properties of liquid metal coolants for GEN-IV. 2010. P. 143–147.
10. Таблицы стандартных справочных данных. Стали 12X18H9T и 12X18H10T. Удельная теплоемкость и удельная энтальпия в диапазоне температур 400–1380 К при атмосферном давлении. ГСССД 32-82. М.: Изд-во стандартов, 1983. 9 с.
11. Таблицы стандартных справочных данных. Сталь нержавеющая марки 12X18H10T. Теплопроводность при температурах 340–1100 К. ГСССД 165-94. М.: Изд-во стандартов, 1994. 10 с.
12. Таблицы стандартных справочных данных. Молибден, монокристаллическая окись алюминия, сталь 12X18H10T. Температурный коэффициент линейного расширения. ГСССД 59-83. М.: Изд-во стандартов, 1984. 6 с.
13. Kruglov A.B., Kruglov V.B., Struchalin P.G., Kharitonov V.S. Study of thermophysical properties of EP-823 steel in the temperature range of 200–900 °C // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2015. Vol. 42, No. 9. P. 264–267.
14. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 267 с.

Статья поступила в редакцию 15 мая 2023 г.,

после доработки — 26 июля 2023 г.,

принята к публикации 21 ноября 2023 г.