

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: ABKruglov@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 жидкокометаллический подслой 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 жидкокометаллического подслоя в ТВЭЛах.

**Ключевые слова:** метод импульсного нагрева, термическое сопротивление контакта жидкого свинца со сталью и керамикой, теплопроводящий жидкокометаллический 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 нитридному 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 жидкокометаллического подслоя (ТЖМП) между топливом и оболочкой толщиной  $\delta_{th} = 0,25 - 0,5$  мм. При использовании ТЖМП вследствие снижения максимальной температуры топлива до значений, меньших  $900^{\circ}\text{C}$  [3], снижается распухание топлива с ростом выгорания и вызванное этим распуханием термомеханическое взаимодействие между топливом и оболочкой, а также уменьшается выход газообразных продуктов дегидратации и их давление на оболочку, что позволяет обеспечить работоспособность ТВЭлов при выгораниях, достигающих 15 % делящихся атомов [2].

Теплопередача через жидкокометаллический теплопроводящий подслой определяется 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 жидкокометаллический подслой в ТВЭЛе может стать определяющим.

Анализ опубликованной литературы по рассматриваемому вопросу показал, что имеющаяся информация о термических сопротивлениях контактов жидких металлов с конструкционными сталью 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 сталью 12Х18Н10Т 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 жидкокометаллического подслоя в ТВЭЛАх.

В настоящей работе представлены результаты исследования термического сопротивления контактов расплава свинца в измерительной ячейке из стали 12Х18Н10Т 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 жидкокометаллический подслой создавался между донышком и крышкой тигля измерительной ячейки установки (рис. 1а). В экспериментах использовались две измерительные ячейки. Ячейка из стали 12Х18Н10Т 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 донышко 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 жидкокометаллического подслоя с топливом и оболочкой.

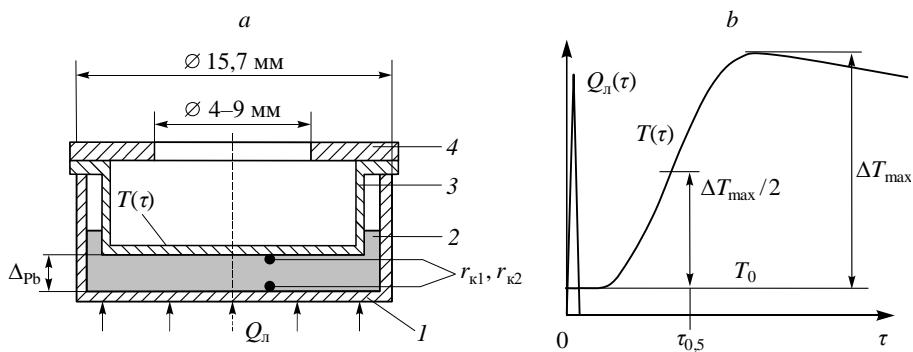


Рис. 1. Измерительная ячейка (а)  
и изменение температуры поверхности крышки при измерениях (б).

1–4 — соответственно донышко, расплав, крышка и диафрагма;  
 $r_{kl1}, r_{kl2}$  — термические сопротивления контактов расплава и поверхностей ячейки;  
размеры приведены в мм.

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

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

$$\theta(\tau) = \theta\left(\tau, T_0, \{l_i\}, \{\lambda_i, c_i, \rho_i\}, r_{kl1,2}, \alpha, \{Q_λ(\tau)\}\right), \quad (1)$$

где  $T_0$  — начальная температура;  $\{l_i\}$ ,  $\{\lambda_i, c_i, \rho_i\}$  — геометрические и теплофизические параметры компонент ячейки;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от поверхности ячейки в окружающую среду;  $\{Q_λ(\tau)\}$  — функция, описывающая форму и длительность импульса (0,3 мс) лазера установки LFA 457 Microflash;  $r_{kl1,2}$  — термические сопротивления контактов расплава свинца с поверхностями донышка и крышки ячейки.

Исследуемые термические сопротивления определялись в процессе подгонки расчетной термограммы  $\theta_p(\tau)$ , 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  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $T_s$  — температура внешней поверхности расчетной области.

При моделировании теплопередачи в ячейке учитывались термические сопротивления  $r_{kl1,2}$  на границах контакта расплава с донышком и крышкой. Возникающие при этом контактные разности температур определялись следующими соотношениями:

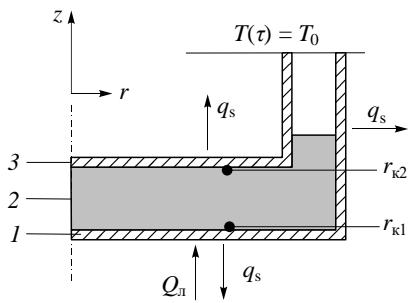


Рис. 2. Расчетная область задачи.  
1–3 — соответственно донышко, расплав и крышка.

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

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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — температуропроводность ( $a$ ), теплоемкость ( $c$ ), плотность ( $\rho$ ) — были получены в диапазоне 300–650 °C в отдельных экспериментах. Так, температуропроводность и теплоемкость  $\text{Al}_2\text{O}_3$  определялись с помощью установки LFA 457 Microflash. Плотность рассчитывалась по результатам измерений термического расширения пластины на дилатометре DIL-402 C и по значению плотности  $\rho = 3,72 \text{ г/см}^3$ , определенной при температуре  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплопроводность  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\lambda = a \cdot c \cdot \rho$  вычислялась на основе полученных данных по температуропроводности, теплоемкости и плотности. Относительные погрешности измерений  $\varepsilon_i$  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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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  $r_{tk} = r_{k1} + r_{k2}$ . При проведении расчетов по численной модели процесса задавалось условие  $r_{k1} = r_{k2} = r_{tk}/2 = r_k$ .

Расчет величины  $r_k$  после предварительной подгонки термограммы  $\theta_p(\tau)$  к  $\theta_s(\tau)$  путем вариаций  $r_k$  и  $\alpha$  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  $\alpha$  мало. В качестве

Таблица  
Теплофизические свойства пластины из  $\text{Al}_2\text{O}_3$

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

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

результаты 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  $\sigma_r^2$  значений  $r_k$  записывается через дисперсии  $\sigma_i^2$  этих параметров как

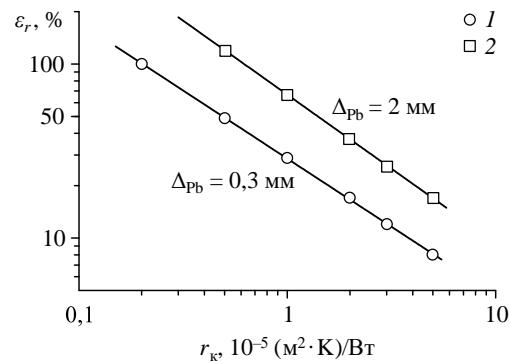
$$\sigma_r^2 = \sum \left( \frac{\partial r_k}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2. \quad (5)$$

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  $\varepsilon_i$  — относительные погрешности измерений параметров  $x_i$ .

Расчеты погрешности измерений  $r_k$  между свинцом и сталью 12X18H10T в измерительных ячейках 12X с зазорами 0,3 и 2 мм при температурах 350, 650 и 800 °C для интервала значений  $r_k = (0,2 - 5) \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$  показали, что зависимостью погрешности измерений от температуры можно пренебречь. Результаты расчетов при температуре 650 °C представлены на рис. 3. Видно, что в ячейках с зазором  $\Delta_{\text{pb}} = 0,3 \text{ мм}$  с погрешностью не более, чем  $\varepsilon_r = 30 \%$ , могут быть измерены термические сопротивления, значения которых превышают  $1 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ . В ячейках с зазором  $\Delta_{\text{pb}} = 2 \text{ мм}$  термические сопротивления, большие  $1 \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ , могут быть измерены с погрешностью менее чем 65 %.

### Последовательность проведения измерений

Перед началом экспериментов выполнялась шлифовка ( $R_z \leq 0,5 \text{ мкм}$ ) 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  $T = 400$  °C, запуск в объем установки аргона, нагрев с темпом 6 К/мин и стабилизация температуры ячейки на уровне 800–950 °C. 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  $\lambda_{\text{эфф}}$ , 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 начались измерения  $r_k$  при охлаждениях и нагревах в диапазоне температур  $T = 350$ –950 °C.

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 °C 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  $950$  °C в цикле нагрева ячейки (1) до 950 °C и ее охлаждении (2) до 350 °C.

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

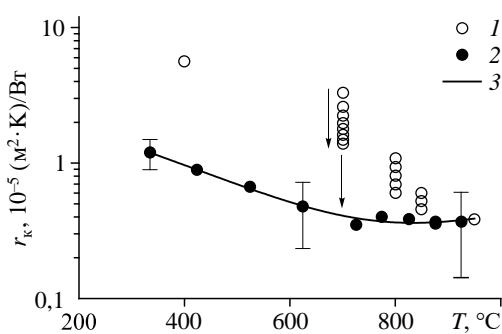


Рис. 4. Результаты изменений  $r_k$  в ячейке 12X

$\text{с } \Delta_{\text{Pb}} = 0,3 \text{ мм.}$   
Нагрев и изотермические выдержки (1),  
охлаждение (2); 3 – зависимость,  
интерполирующая установившиеся значения  $r_k^*$ .

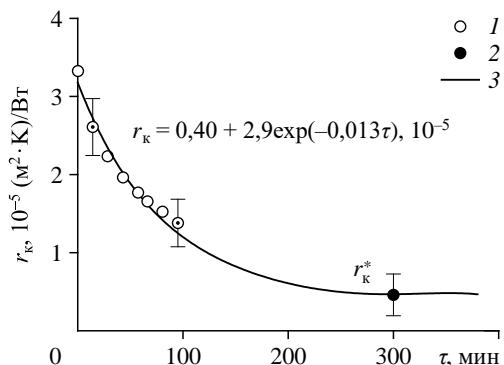


Рис. 5. Релаксация  $r_k$  при  $T = 700$  °C.

1 – результаты измерений;  
2 – значения  $r_k^*$ ;  
3 – интерполирующая зависимость.

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

Также было установлено, что термические сопротивления, измеренные после выдержки при  $T_b = 800 - 950$  °C, при охлаждении до  $T = 350$  °C и последующем нагреве до  $T = 950$  °C 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 установленным 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 выше 650 °C периодически происходило разрушение оксидных пленок и локальное смачивание расплавом поверхности стали, из-за чего его термическое сопротивление контакта снижалось до установленных при данной температуре значений  $r_k^*$ .

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

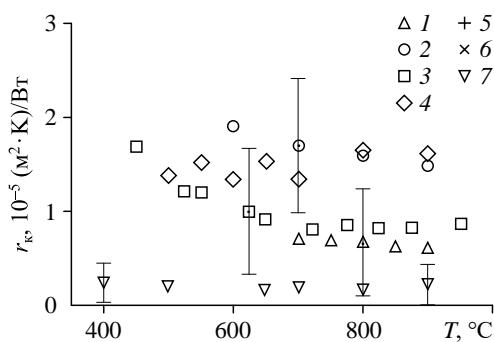
### Термическое сопротивление контакта расплава свинца при повторных плавлениях и кристаллизациях

В работе [5] было установлено, что при повторных плавлениях свинца на стальных ЭП-823 и 12Х термические сопротивления контактов увеличивались и после пяти плавлений достигали значений  $r_k^* \approx (0,5 - 1) \cdot 10^{-5}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

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

Первые плавления свинца проводились в форвакууме. Затем для формирования установленного теплового контакта расплава ячейка 12Х нагревалась до температуры 900 °C, а ячейка ЭП-823 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — до 800 °C. Последующие плавления свинца и выдержки между плавлениями проводились в атмосфере аргона.

На рис. 7 представлены результаты измерений при  $T = 650$  °C зависимости значений  $r_k^*$  в ячейках 12Х и ЭП-823 + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от количества плавлений свинца. Полученные



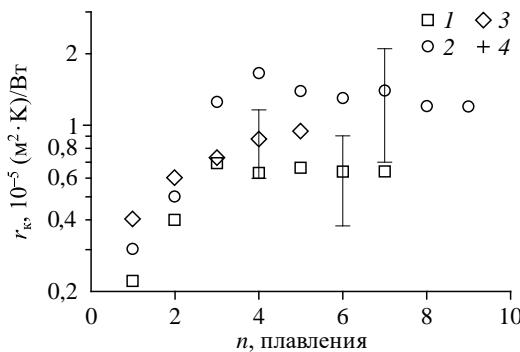


Рис. 7. Зависимость  $r_k^*$  при  $T = 650$  °C от количества плавлений в ячейках 12Х с  $\Delta_{\text{Pb}} = 0,3$  (1) и 2 (2) мм, в ячейке ЭП-823 +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с  $\Delta_{\text{Pb}} = 0,3$  мм (3) и в ячейке из стали ЭП-823 с  $\Delta_{\text{Pb}} = 2$  мм (4) [5].

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

На рис. 8 представлены результаты измерений  $r_k^*$  для последовательности плавлений свинца в ячейке ЭП-823 +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в зависимости от температуры. Среднее значение термического сопротивления контакта  $r_k^*$  в интервале температур 400–650 °C составляет после пяти плавлений  $1,0 \cdot 10^{-5}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

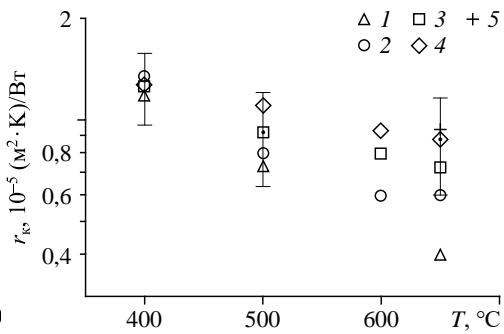


Рис. 8. Результаты измерений  $r_k^*$  в ячейке ЭП-823 +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с  $\Delta_{\text{Pb}} = 0,3$  мм для последовательностей плавлений №№ 1–5.

### Термическое сопротивление ТЖМП

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

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

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

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

Можно заключить, что 60 % вклада в  $r_{\text{пп}}$  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 жидкотемпературного теплопроводящего подслоя интервале температур 400–650 °C величина термического сопротивления контакта  $r_k^*$  в ячейке ЭП-823 +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с  $\Delta_{\text{Pb}} = 0,3$  мм составляет  $1,0 \cdot 10^{-5}$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

ческого сопротивления контакта расплава свинца с теплоотдающими поверхностями может составлять  $1 \cdot 10^{-5}$  (м<sup>2</sup>·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 жидкокометаллическим 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 breeder reactors // 11th Intern. Conf. on Nuclear Engng. Tokyo, Japan, April 20-23, 2003, ICONE11-36415. Р. 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 Institut. 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. Лещенко 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 12Х18Н9Т и 12Х18Н10Т. Удельная теплоемкость и удельная энталпия 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 12Х18Н10Т. 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 12Х18Н10Т. 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.