

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Беликова Романа Сергеевича “**Экспериментальное исследование теплофизических свойств системы Мо-С эвтектического состава и графита при высоких температурах**”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Суть диссертационной работы Р.С. Беликова заключается в исследовании отклика металл-углеродных систем на сосредоточенный нагрев образца импульсом электрической мощности. Ее содержание включает в себя постановку измерений тепло- и электрофизических свойств тугоплавкой металл-углеродной системы  $\text{MoC}_{0,82}$  в области температур 1500-2900 К и изобарного термического расширения пиролитического графита в области температур 3000-4800 К. Измерения осуществлены на специально разработанной экспериментальной установке для исследования тугоплавких электропроводящих материалов, действующей в области субмиллисекундных характерных времен нагрева с возможностью пирометрического измерения температуры. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (109 наименований), содержит 147 страниц текста, включая 73 рисунка и 20 таблиц.

**Во введении** автором дается общая характеристика исследования, формулируется его цель, последовательно оцениваются научная новизна, достоверность представленных результатов и их значимость, излагаются положения, выносимые на защиту, предоставляются сведения о личном вкладе, апробации работы и публикациях.

**Первая глава** имеет ключевое значение для понимания работы и ее оценки. В ней представлен анализ различных методов исследования теплофизических свойств тугоплавких металлов и их карбидов в области высоких давлений и температур, дается описание методики подготовки и проведения экспериментов, подробно рассмотрены различные элементы экспериментальной установки.

При выборе конструкции крепления образцов нижняя цапга была сделана подвижной для обеспечения свободного расширения образца вдоль его продольной оси. Подобный выбор, непростой по своему исполнению, повысил надежность работы с хрупкими материалами, к которым относятся исследуемые образцы.

Хорошо подходит «под задачу» и грамотно осуществлена система останковки импульса нагрева по достижению образцом заранее заданной температуры. Такой подход позволяет, например, предотвратить плавление и дальнейшее разрушение образца, сохранив его для последующего микроструктурного анализа. В плане развития работы, отметим, что разработанная автором методика отключения тока по сигналу от пирометра могла бы способствовать калибровке пирометра (тонкой процедуре, обязательной при подобных измерениях) по показаниям малоинерционной термопары в серии опытов при пошаговом повышении температуры. Удачная реализация малоиндуктивного бифилярного шунта позволила практически полностью исключить индуктивные выбросы на фронте и спаде рабочего импульса тока. На высоком уровне выполнена и система сбора данных. Она позволяет по окончании

импульса получить и визуализировать необходимые для дальнейшей обработки переменные: ток в цепи образца, падение напряжения на образце и данные от двух пирометров. Быстродействующий (100 нс) 16-тиразрядный 4-канальный аналого-цифровой преобразователь обеспечивает требуемую условиями задачи точность преобразования. Таким образом, достоверность первичных данных электронной схемы опыта сомнений не вызывает.

Методика пирометрических измерений, напротив, недостаточно обоснована. На стр. 19 указана ссылка на литературный источник по «современным методам и аппаратуре оптической пирометрии» 30-летней давности. С тех пор вышло немало публикаций. Укажем, в этой связи, монографию А.Н. Магунова, обобщающую методы спектральной пирометрии, в том числе, в актуальных для диссертационной работы диапазонах температуры и продолжительности измерения (Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 248 с.). Следуя Магунову, принятые в диссертации модель «серого тела» и приближение Вина для используемых длин волн пригодны для измерений «цветовой» температуры с неопределенностью в 1% *без дополнительных исследований* при значениях, не превышающих 1500 К. Современный подход предполагает проведение быстродействующей спектрометрии теплового излучения для обоснованного выбора участка «серости» конкретного образца.

В разделе 4.4, посвященном описанию разработанного двухканального пирометра, опущены важные методические подробности пирометрических измерений. Например, не пояснено, насколько стабилизированы коэффициенты передачи по спектральным каналам, насколько качественно преобразуют сигнал быстродействующие логарифмические преобразователи, не указан тип примененных устройств. Компрессия сигналов логарифмическими полупроводниковыми преобразователями несет скрытую неопределенность в качестве и повторяемости измерительных операций, в частности, по причине утечек в преобразователе и зависимости инерционности устройства от величины фототока.

**Вторая глава** посвящена апробации экспериментальной установки в опытах с образцами из молибдена и тантала. В ней представлены результаты численного моделирования эксперимента, нацеленного на оценку оптимальных значений существенных для опыта параметров электрической схемы, диапазонов изменения переменных, отслеживаемых системой сбора данных, характерного времени нагрева образца и типичных погрешностей измерений. Результаты оценки применены при последующей постановке опытов. Отметим, что полученные в опытах данные по энтальпии, теплоемкости, удельному электрическому сопротивлению и линейному термическому расширению тестовых образцов согласуются с известными литературными данными. Важно, что опыты были проведены как в твердой, так и в жидкой фазе тестовых образцов.

Известно, что методы спектральной пирометрии требуют тщательной калибровки. Также известно (и отмечено в работе), что методическая погрешность пирометрии может многократно превышать приборную погрешность при неизвестной излучательной способности образца. В этой связи, утверждение «...погрешность

измерения температуры не превышала  $\pm 2 \%$ », (стр. 54, 90), на основании одной калибровочной точки плавления MoC представляется излишне оптимистичным. Работа бы выиграла при соответствующей калибровке на исследуемом образце с помощью, как отмечено выше, системы останковки нагрева по сигналу от пирометра. В этом случае, уточненное выражение для расчета температуры включало бы в себя аппаратные и калибровочные коэффициенты.

**В третьей главе** представлены экспериментальные данные о теплофизических свойствах системы Mo-C эвтектического состава в области высоких температур и давлений. Проведено исследование фазового состава образца и возможного влияния фаз на исследуемые свойства, предваряющее измерения. По результатам измерений определены значения удельной энтальпии и теплоемкости, теплоты и температуры плавления исследованного образца. Обнаружено, что экспериментальное значение температуры плавления в пределах погрешности соответствует данным стационарных измерений. С помощью развитой методики построения аппроксимационного полинома, построены зависимости энтальпии, теплоемкости и электросопротивления от температуры; рассчитан коэффициент термического расширения в интервале температур 2350-2800 К. В контексте методических требований к пирометрическим опытам, отметим, что эффекты, подобные представленному на рис. 56 плавному нарастанию теплоемкости, могут быть объяснены, среди прочего, плавным изменением излучательной способности образца, сопровождающимся значительным изменением скорости нарастания температуры при не столь явных ее абсолютных отклонениях.

**В четвертой главе** представлены экспериментальные данные о термическом расширении пиролитического графита как в перпендикулярном, так и в параллельном базисной плоскости направлении. Опыты поставлены в области повышенных (3000-4800 К) температур при статическом давлении аргона 1 кбар. Описана специфика проведения таких измерений, обусловленная целым рядом обстоятельств, осложняющих измерения. Обнаружено, что температурная зависимость КТР графита во всех направлениях вплоть до точки плавления согласуется с литературными данными, известными для области температур ниже 3300 К. С помощью полученных результатов удалось определить зависимость плотности графита от температуры и также сопоставить ее с известными данными.

**В заключении** представлено обобщение результатов работы, выполненной на созданной автором экспериментальной установке.

Перейдем к *общей оценке* работы. **Актуальность и практическая значимость** работы следует уже из ее названия и содержания поставленных в ней задач. Действительно, карбиды тугоплавких металлов являются перспективными компонентами тугоплавких материалов, применяемых в современных высокотемпературных технологиях, где комплекс теплофизических свойств материала играет ключевую роль. В данном контексте содержание **положений, выносимых на защиту**, не вызывает дополнительных вопросов у читателя. Их обоснованность естественным образом вытекает из текста введения и анализа состояния проблемы, представленного в первой главе. Разработанная экспериментальная установка и

методика подготовки образцов и проведения измерений позволили получить **новые данные** по теплофизическим свойствам исследованных образцов в области высоких температур и давлений, где применение стационарных методов или невозможно, или недостаточно надежно. Подробный анализ источников погрешности измерений, а также апробация метода и установки на веществах с известными свойствами, служат естественным обоснованием **достоверности** результатов. Результаты работы могут быть применены в научно-исследовательской работе, проводимой в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институте теплофизики УрО РАН, в Уральской государственной горной академии, РФЯЦ – ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина, на предприятиях атомной энергетики и авиакосмической отрасли.

Содержание автореферата соответствует основным идеям и результатам диссертации. Собственно результаты достаточно полно опубликованы в научных журналах, входящих в перечень ВАК. В то же время, в списке опубликованных диссертантом статей отсутствуют традиционные теплофизические издания.

Оформление работы выполнено на высоком уровне. К сожалению, в тексте присутствуют грамматические и стилистические ошибки. Встречается путаница в терминах теплообмена, в частности, неуместное применение термина «теплопередача», стр. 76, 125. Неудачным является применение прилагательных «прямой» при описании метода измерения температуры (19, 28, 136) и «истинный» применительно к температуре (рис. 36, табл. 11, стр. 53 ...).

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Приведенных на стр. 54 аргументов недостаточно для предположения о «серости» образца в указанном спектральном интервале исследуемой области температур. Для обоснованного выбора участка «серости» конкретного образца требуется проведение быстродействующей спектрометрии теплового излучения.
2. Оценка методической погрешности пирометрических измерений температуры на стр. 90 величиной в 2% представляется заниженной.
3. Отдельной проблемой является неравномерность распределения значений температуры по длине образца и соответствующие этому распределению тепловые потери с его поверхности, в первую очередь, при измерениях под давлением. При отношении длины к характерному размеру сечения около 10 (рис. 12, стр. 29), вряд ли целесообразно пренебрегать влиянием перераспределения температуры и тепловых потерь. Было бы уместно привести кадр фотосъемки образца при высокой температуре для демонстрации распределения значений температуры по интенсивности теплового излучения с его поверхности.
4. В заключении отсутствует общий вывод по работе. Приведен формальный перечень основных результатов, совпадающий (за исключением деталей) с содержанием разделов «Научная новизна» и «Положения, выносимые на защиту».

Диссертация Р.С. Беликова является законченной научно-квалификационной работой, направленной на комплексное исследование тепло- и электрофизических свойств тугоплавкой металл-углеродной системы  $MoC_{0,82}$ . Работа соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника и

удовлетворяет всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а её автор, Беликов Роман Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил:

Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории быстропротекающих процессов  
и физики кипения ИТФ УрО РАН

 Скрипов Павел Владимирович

620016, Россия, г. Екатеринбург,  
ул. Амундсена, 107а  
тел. (343) 2678800,  
e-mail: pavel-skripov@bk.ru

Врио директора  
ИТФ УрО РАН, к.ф.-м.н.



Волосников Дмитрий Владимирович

620016, Россия, г. Екатеринбург,  
ул. Амундсена, 107а  
тел. (343) 2678801,  
e-mail: dima-volosnikov@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт теплофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
620016, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а  
тел. (343) 2678801,  
e-mail: itp@itp.uran.ru

7 мая 2018 г.