

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 30 мая 2018 г. (протокол № 9)

Защита диссертации **Беликова Романа Сергеевича**  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
**«Экспериментальное исследование теплофизических свойств системы  
Mo-C эвтектического состава и графита при высоких температурах»**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Москва – 2018

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
Протокол № 9 от 30 мая 2018 г.

Диссертационный совет Д 002.110.02 утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 23 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02  
д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

**Ученый секретарь** – ВРИО ученого секретаря диссертационного совета  
Д 002.110.02 д.ф.-м.н., профессор Василяк Л.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
4	Васильев М.М.	К.ф.-м.н.	01.04.08	Отсутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
12	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
13	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
16	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
17	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
18	Иванов М.Ф.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
22	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
23	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
24	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
25	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
26	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
27	Савватимский А.И.	Д.т.н.	01.04.14	Присутствует
28	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
31	Якубов И.Т.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 1.1.3 – широкодиапазонных уравнений состояния Научно-исследовательского центра теплофизики экстремальных состояний (НИЦ-1 ТЭС) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Беликова Романа Сергеевича** на тему «Экспериментальное исследование теплофизических свойств системы Мо-С эвтектического состава и графита при высоких температурах». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в лаборатории 1.1.3. – широкодиапазонных уравнений состояния НИЦ-1 ТЭС ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Научный руководитель:**

**Сенченко Владимир Николаевич** – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории 1.1.3. – широкодиапазонных уравнений состояния Научно-исследовательского центра теплофизики экстремальных состояний Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

**Скрипов Павел Владимирович** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор, лаборатория быстропротекающих процессов и физики кипения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН; Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106).

**Хлевной Борис Борисович** – гражданин РФ, к.т.н., начальник лаборатории радиометрии, фотометрии, спектрофотометрии и колориметрии некогерентного излучения научно-исследовательского отделения М-4 Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений» (ВНИИОФИ, Россия, 119361, г. Москва, ул. Озерная, 46).

### **Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ им. Кутателадзе СО РАН; Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.).**

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Скрипов П.В. и к.т.н. Хлевной Б.Б., научный руководитель Беликова Р.С. к.ф.-м.н. Сенченко В.Н.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Добрый день, уважаемые члены совета и все присутствующие. Беликов Роман Сергеевич претендует у нас на заключительное выступление сейчас. Сначала документы, Леонид Михайлович, надеюсь, все у нас в порядке?

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Ну, я думаю, что вопросов нет? Роман Сергеевич, в пределах 20 минут, пожалуйста.

### Беликов Р.С.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Беликова Р.С. прилагается).*

### Председатель

Спасибо. Какие есть вопросы к Роману Сергеевичу?

### Иосилевский И.Л.

Роман, один из результатов, которые вы вынесли на защиту, это создание установки ... ну и до двух килобар, а тем не менее по карбиду молибдена вы ограничили результаты только температурой 2800 К и только одним единственным эвтектическим составом. Вопрос у меня в связи с этим следующий: что, как любят выражаться наши научные руководители, кроме ложной скромности, помешало вам экспериментировать при более высоких температурах и при других составах? Я поясню вопрос: если вы отходите от эвтектики влево или вправо, то у вас плавление становится неконгруэнтным, значит начинается и заканчивается при разных температурах, и во-вторых начинает сильно зависеть от скорости нагрева. То есть создается впечатление, что у вас в руках был богатейший материал, тем не менее, вы его не стали получать или выдвигать на защиту. Почему, вопрос?

### Беликов Р.С.

Спасибо за вопрос. В первую очередь про температуру. Данная температура, порядка 3000 К была достигнута для карбида молибдена и порядка 4800 К для графита, потому что далее образцы чаще всего разрушаются по причине того, что нагрев этим способом продолжить крайне сложно и затруднительно. Однако мы хотим увеличивать скорость нагрева, что позволит нам продвинуться выше по температуре. Наш пирометр позволяет мерить до 10 кК, однако материалы не позволяют достичь этой температуры, потому что разрушаются, но если мы увеличим скорость, то некоторые материалы будут уходить дальше в жидкой фазе, и можно будет мерить их свойства выше.

Теперь насчет эвтектического состава и нашей исследованной стехиометрии. Сложность заключается в том, что данные составы сложно изготавливать. Они должны быть высокооднородными, для этого их желательно переплавлять, для того, чтобы однородность была высокой и они были гомогенны. Поэтому изготавливать их на пространствах лаборатории у нас сейчас невозможно, и мы используем готовые уже литые заготовки.

**Иосилевский И.Л.**

Фабричные?

**Беликов Р.С.**

Ну, не фабричные, но изготовленные во ВНИИОФИ, где это вещество используют как раз таки в качестве...

**Иосилевский И.Л.**

Вот какое дают, с тем вы и работаете?

**Беликов Р.С.**

Да. Этот состав выбран потому, что он у нас есть, и у нас в планах есть сдвиг по стехиометрии и исследование веществ с другой стехиометрией, потому что они, как вы абсолютно правильно сказали, представляют несомненный интерес тем, что плато плавления там будет наклонным, точки начала и конца плавления там будут иметь разную температуру. Здесь же у нас имелся именно эвтектический состав с такой стехиометрией, что мы подтвердили плоскостью плато, но кроме того, он изначально таким и задумывался для стационарных экспериментов. Поэтому в наших планах исследовать карбиды других стехиометрий, но их опять же нужно где-то взять, потому что изготовить их у нас в лаборатории нельзя.

**Иосилевский И.Л.**

Хорошо, вы ответили на вопрос.

**Председатель**

Спасибо, еще вопросы. Пожалуйста.

**Вараксин А.Ю.**

Роман Сергеевич, вот вы на одном из слайдов показывали табличку, где у вас погрешности. Один, два, три, четыре процента по разным характеристикам, вы их оценивали как экспериментатор очень четко. В то же время, в ваших аппроксимационных зависимостях присутствует шесть значащих цифр. Вопрос: не многовато ли?

**Беликов Р.С.**

Спасибо за замечание. В случае аппроксимационных зависимостей следовало уменьшить количество значащих цифр до разумных пределов. Также могу сказать, что линейное расширение с погрешностью 10 %, в ряде экспериментов проводилось его измерение и с лучшей точностью, с меньшей погрешностью, поэтому здесь отражена лишь самая худшая погрешность, то есть самая низкая точность измерения. В реальности в ряде экспериментов при ряде условий, таких как зависимость от исследуемого материала и от температуры, при которой проводились измерения, у нас точность могла быть выше.

**Председатель**

Но не шесть знаков?

**Беликов Р.С.**

Но в любом случае не шесть знаков.

**Дьячков Л.Г.**

А какая? До какой точности мерилось?

**Беликов Р.С.**

До одного-двух процентов в принципе, но это в самых идеальных условиях.

**Воробьев В.С.**

По поводу плавления. Вы измеряли температуру плавления графита пиролитического?

**Беликов Р.С.**

Саму температуру мы не измеряли, нашу цель была именно измерение расширения графита.

**Воробьев В.С.**

Но у нас в ИВТАНе был старый спор между группой Савватимского и Башарина. Как ваше отношение, кто из них прав и как ваши результаты соотносятся с этим старыми измерениями? Правда, у них были разные темпы нагрева существенно, насколько я помню.

**Беликов Р.С.**

Наш темп нагрева отличается от темпа нагрева, допустим, группы Савватимского, а температура, которую мы получаем, это 4800 К.

**Воробьев В.С.**

Там 5000 К у него была, по-моему, а у другой группы была более низкая существенно температура.

**Иосилевский И.Л.**

Вообще, общую картину было бы хорошо как-то рассмотреть

**Воробьев В.С.**

У вас написан вывод, что впервые умеренно линейное расширение пиролитического графита, но представляется, вряд ли впервые.

**Беликов Р.С.**

Именно изобарическое расширение в данном интервале температурном.

**Воробьев В.С.**

Ну хорошо. На основной вопрос какой ответ? По температуре плавления, что у вас получилось?

**Беликов Р.С.**

Она отличается от ряда исследователей и совпадает с некоторыми другими.

**Воробьев В.С.**

Но ниже пяти тысяч все-таки.

**Беликов Р.С.**

Есть значения порядка четырех с лишним тысяч, мы выше них, но ниже пяти. Порядка 4800 К плюс-минус 100 К. У нас яркостная температура четыре тысячи с половиной, истинная будет еще выше.

**Кириллин А.В.**

Что значит с половиной, четыре пятсот?

**Беликов Р.С.**

Четыре пятьсот я имею в виду, да.

**Председатель**

А у вас, Александр Владимирович?

**Кириллин А.В.**

Четыре.

**Дьячков Л.Г.**

А давления разные.

**Председатель**

Так, ну это вроде как дискуссия, вопросы еще есть?

**Амиров Р.Х.**

Ваш метод измерения, соответствующая методика, связана с методом нагрева, вы используете нагрев электрическим током. И поднимаетесь в область высоких температур, 2800 К. Вот если нагревать другим способом, лазерный нагрев, электронный пучок, эти методики могут быть конкурентоспособны? В чем плюс и в чем недостаток?

**Беликов Р.С.**

Одним из основных плюсов именно нашей методики импульсного электрического нагрева является в первую очередь однородность такого нагрева. То есть в отличие от лазерного нагрева у нас вещество нагревается абсолютно однородно, и поэтому можно исследовать его объемные, удельные свойства, как, собственно,  $C_p$  и энтальпию. Кроме того, электросопротивление опять же прямым способом мы измеряем с помощью электронагрева. Это основной плюс нашего метода, что нагрев однородный, объемный.

**Председатель**

Но пучком тоже можно однородно.

**Амиров Р.Х.**

А скажите нам, существуют вообще работы по измерению свойств подобных тугоплавких материалов, при которых используются другие методы нагрева? Они вообще существуют в этой области температур?

**Беликов Р.С.**

В зависимости, о каких параметрах измеряемых идет речь.

**Председатель**

Но в принципе они есть?

**Беликов Р.С.**

В принципе они есть, да.

**Амиров Р.Х.**

Существуют установки, на них измеряется. И вы в этой области начинаете с ними конкурировать, имея некие плюсы?

**Беликов Р.С.**

Да.

**Амиров Р.Х.**

Спасибо.

**Председатель**

Еще вопросы?.. Тогда, Владимир Николаевич, вам слово. О соискателе, исключительно.

**Сенченко В.Н.**

Роман Сергеевич работает у меня после окончания Физико-Технического института и до этого делал диплом. И стало быть, получается более семи лет, почти восемь. За это время были разные периоды его работы. То есть, кроме вот этой его работы, которую он здесь продемонстрировал, он и в лазерных экспериментах участвовал, и за это время он стал хорошим экспериментатором. Такие люди нужны на установках, чтобы развивать новые направления. Вот эта работа, которая, в общем-то, имеет давние корни и базируется на давних наработках, она показала, что еще не все здесь сделано, что касается карбидов в первую очередь. Потому что и составы, и скорости нагрева, и кинетика процесса, это можно все исследовать. А главное еще что, как характеризовать человека - бесконфликтный хороший человек, с которым приятно работать. Надеюсь, не только мне.

**Председатель**

Спасибо, Владимир Николаевич. Работа будет продолжаться, я так понимаю?

**Сенченко В.Н.**

Да, вот в выводах, последних добавленных - будем продолжать.

**Председатель**

Леонид Михайлович, пожалуйста, ознакомьте нас с письменными отзывами.

**Ученый секретарь**

К нам поступили отзывы от **ведущей организации**, это **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук**. Отзыв положительный, есть замечания.

*Замечание первое.* На странице 98 приведены результаты исследований фазового состава исходных образцов. Если пересчитать указанные выше цифры, то рентгенографические измерения были выполнены для состава  $MoC_{0,65}$ , что существенно отличается от заявленного состава исследованных образцов. Чем объясняется такое расхождение?

*Второе.* Хотя обработка первичных данных по калорическим свойствам эвтектики  $MoC_{0,82}$  может быть проведена различными методами и, во многом, выбор определяется предпочтениями автора, однако примененная процедура вызывает некоторые вопросы. В тексте диссертации отсутствуют первичные данные по теплоемкости эвтектики, рассчитанные по формуле (3.5). Эти данные дали бы возможность обосновать вид аппроксимационной зависимости для теплоемкости. Вместо этого уже изначально было положено, что зависимость теплоемкости будет линейной с дополнительным вакансионным членом. Поиск нелинейной поправки основывался на аппроксимации данных по энтальпии в интервале 250 К (1600-1850 К) и последующей экстраполяции почти на 1000 К. Очевидно, что это будет приводить к большим погрешностям в определении энергии вакансий и энтропийного множителя. Чем обоснован такой выбор методики обработки?

*Третье.* При нагреве эвтектики  $MoC_{0,82}$  в ней происходят изменения фазового состава и структурные превращения в составляющих ее карбидах (см. диаграмму на рис. 50). Все эти твердофазные превращения, в том числе с радикальным изменением кристаллической



структуры, могут растягиваться на значительные температурные интервалы, особенно при высоких скоростях нагрева. Это подтверждается и полученными в диссертации данными, где на температурной зависимости энтальпии отсутствуют ее скачки. В такой ситуации измеренные значения теплоемкости могут являться эффективной величиной, которая включает собственную теплоемкость эвтектики и дополнительный вклад от изменения энтальпии при твердофазных превращениях. Можно ли в этой ситуации считать, что причина резкого роста теплоемкости при высоких температурах связана с образованием термических вакансий?

*Замечание четыре.* В тексте диссертации содержатся некоторые неточности. Дальше эти неточности перечисляются. На странице 12, при рассмотрении методов экспериментального исследования энтальпии и теплоемкости, в качестве классического стационарного метода указан "метод падающего калориметра". Скорее всего, речь идет о методе смещения, а "метод падающего калориметра" это лишь дословный перевод с английского. На странице 119 приводятся абсолютно нереальные цифры по тепловому расширению графитов: "Величина теплового расширения графитов при их нагреве до температуры плавления варьируется в различных литературных источниках в широком диапазоне от 70 % [98] до 50 % и 45 % [99, 100]". Ошибки в формулах (3.2) и (3.7): вместо  $\tau$  указано  $\Delta t$ , вместо  $\Delta H_V - \Delta H_{298}$ , соответственно. Значения некоторых коэффициентов в аппроксимационных полиномах для энтальпии (3.4) и теплоемкости (3.8), хотя и незначительно, но отличаются.

*И пятое.* Ряд замечаний по оформлению рукописи. Не информативен рисунок 8, отсутствуют указания скоростей нагрева на рисунке 9. Число значащих цифр для данных по энтальпии и теплоемкости в табл. 10 (страница 101) существенно больше, чем погрешности их значений. Рисунки 72 и 73 сложно отличить друг от друга и их следовало бы объединить.

Теперь отзывы на автореферат.

Первый – **Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ**. Отзыв подписан старшим научным сотрудником к.т.н. **Тенишевым**, отзыв положительный с замечаниями.

Первое. К сожалению, в автореферате соискатель не приводит экспериментальных фотографий, на основании которых производились расчеты термического расширения. Заявленная погрешность определения приращения длины в 10 % слишком велика по сравнению с возможностями современных дилатометров и рентгеновских аппаратов. Поэтому хотелось бы иметь возможность повышения точности определения данной характеристики с помощью предложенной в работе методики.

Второе. В автореферате не представлена диаграмма состояния системы Mo-C и какое-либо ее обсуждение, а также практически не описаны процедуры подготовки экспериментальных образцов и их аттестации, что может служить источником дополнительных методологических ошибок.

Отзыв номер два. **Национальный исследовательский университет МЭИ**. Доцент кафедры инженерной теплофизики старший научный сотрудник к.т.н. **Мирошниченко В.И.** Отзыв положительный с замечаниями.

Первое. В автореферате не указано, на чем основано принятое приближение серого тела.

Второе. Если данные о коэффициенте излучения карбида молибдена отсутствуют, то интересно было бы получить такую информацию из проведенных в данной работе измерений яркостной температуры карбида молибдена.

### Председатель

Спасибо. Пожалуйста, вам слово для ответа.

**Беликов Р.С.**

Я сгруппирую свой ответ, так как некоторые из ответов на замечания пересекаются.

Сначала насчет системы. Система была действительно  $\text{MoC}_{0,82}$  и никакая другая. Приведенные цифры фазового соотношения карбидов молибдена в исследуемом эвтектическом составе относятся к результатам рентгенографических исследований. Данные исследования позволили вычислить величину соотношения между двумя типами карбидных кристаллических структур, обнаруженных в веществе, и при расчете этой цифры присутствие в веществе свободного углерода в виде графита в расчет не бралось. Так как количество последнего в составе исследуемого вещества составляет около 0,5 % по весу, процентный состав вещества останется весьма близким по величине приведенным цифрам и после учета наличия в веществе свободного углерода.

Далее, что касается методики расчета теплоемкости. Так называемые «сырые» экспериментальные данные по зависимости вложенной энергии (т.е. энтальпии)  $\text{MoC}_{0,82}$  от времени демонстрируют наличие выраженной шумовой дорожки и не позволяют вычислить производную (для поиска удельной теплоемкости) в чистом виде. Поэтому для априорной аппроксимации теплоемкости исследуемого материала была выбрана указанная в работе модель, подразумевающая экспоненциальный рост теплоемкости в области предплавления, обусловленный в первую очередь вакансионным вкладом согласно широко представленной в литературе модели. Подробное описание такого подхода можно найти, например, в классических статьях Бодрякова, Крафтмахера и Чеховского.

Третье, энергетический вклад фазовых превращений в процессе нагрева исследуемого вещества действительно мог бы оказать заметное влияние на поведение энтальпии и теплоемкости в области предплавления. Однако результаты рентгенографических исследований, которые продемонстрировали, что  $\text{MoC}_{0,82}$ , нагретый за 1 мс до температуры 2300 К, а затем в течение порядка сотни миллисекунд остывший до комнатной температуры, имеет практически тот же фазовый состав, что и материал, нагреву не подвергавшийся. Отсюда следует вывод, что как минимум до этой температуры фазовых превращений в исследуемом веществе не происходит, в то время как рост теплоемкости в области предплавления наблюдается, начиная от меньших температур.

Четвертое, приведенные величины теплового расширения графитов, взятые из литературы, относятся к низкоплотным ( $1-1,5 \text{ г/см}^3$ ) сортам графита, в отличие от рассматриваемого в диссертации.

Теперь, что касается приближения «серого» тела и оптических измерений. Обоснованием приближения серого тела служит хорошее согласие экспериментальных данных по температуре плавления исследуемого вещества, полученных в данной работе в ходе импульсных экспериментов с данными, полученными другими авторами в ходе стационарных экспериментов. Дополнительным подтверждением обоснованности использованного приближения могут служить эксперименты, проведенные после завершения данной работы, которые подтвердили слабую зависимость спектральной излучательной способности  $\text{MoC}_{0,82}$  от длины волны при высоких температурах. Упомянутые эксперименты позволяют оценить значение спектральной излучательной способности  $\text{MoC}_{0,82}$  на указанных длинах волн (650 нм и 862 нм) при высоких температурах 2330 К как равную  $\varepsilon_{\lambda 1, \lambda 2} \approx 0,4$ .

### **Председатель**

Хорошо, спасибо. Давайте перейдем к заслушиванию оппонентов. Первый оппонент у нас Павел Владимирович Скрипов, будьте любезны. Я думаю, что пересказывать диссертацию не нужно.

### **Скрипов П.В.**

Здесь как вы скажете, я сразу загляну к себе в конец: отзыв положительный, я буду поддерживать. Диссертация мне понравилась, одно - очень длинная. Поскольку я вынужден был прочитать на три раза, это получилось более четырехсот страниц, поэтому отзыв тоже написал длинный. Если можно будет сократить, я как-то тут сокращаю.

Сначала идет рассмотрение работы по главам. Я тихонечко это перечислю и перейду к общей оценке работы и замечаниям. 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 цанга 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.

Далее, 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 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, это было показано. На высоком уровне выполнена и система сбора данных. Она позволяет все, что требуется по задачам. Таким образом, достоверность первичных данных электронной схемы опыта сомнений не вызывает.

Методика пирометрических измерений, напротив, недостаточно обоснована. И далее идет перечисление, что бы можно было сделать не так, если эта работа была бы поручена мне. В разделе, посвященном описанию разработанного двухканального пирометра, опущены важные, на мой взгляд, методические подробности пирометрических измерений. Например, не пояснено, насколько стабилизированы коэффициенты передачи по спектральным каналам, насколько качественно преобразуют сигнал быстродействующие логарифмические преобразователи, понятно, да, почему: логарифм очень сильная функция; не указан тип примененных устройств. Компрессия сигналов логарифмическими полупроводниковыми преобразователями, поскольку они могут быть осуществлены только в аналоговом виде, 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 доложена была хорошо, здесь особо придраться не к чему, но есть одно замечание, которое переключается с первым вопросом Игоря Львовича, что 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.

Далее идет расклад по третьей главе и по четвертой. 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 у читателя дополнительных вопросов. 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. 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. Далее отмечено в тексте наличие грамматических и стилистических ошибок, путаница в терминах теплообмена, в частности, неуместное применение термина «теплопередача», странице 76, 125 и еще несколько неудачных применений прилагательных.

По диссертации имеются следующие замечания:

Первое. Приведенных на странице 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 спектроскопии теплового излучения.

Второе. Оценка методической погрешности пирометрических измерений температуры на странице 90 величиной в 2% представляется заниженной.

Третье. 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 (это рисунок 12 на странице 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.

Ну и четвертое. 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». В выступлении я, должен сказать, вывод по работе увидел.

Диссертация Беликова является законченной научно-квалификационной работой, направленной на комплексное исследование тепло- и электрофизических свойств тугоплавкой металл-углеродной системы. Работа соответствует паспорту специальности 01.04.14 и удовлетворяет всем критериям, установленным пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, её автор, Беликов Роман Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### **Председатель**

Спасибо большое, Павел Владимирович. Я думаю, что вопросов к оппоненту у нас нет, поэтому давайте перейдем к заслушиванию второго оппонента...

### **Дьячков Л.Г.**

А ответы?

### **Председатель**

Да, правильно, замечания были.

### **Беликов Р.С.**

В ответе на предыдущие вопросы я частично коснулся уже обоснованности использования серого приближения. После завершения работы над текстом диссертации был проведен ряд экспериментов, в которых были получены спектры теплового излучения системы  $\text{MoC}_{0,82}$  в области высоких температур (при температурах 1973-2330 К). Полученные спектры подтвердили использованное в диссертационной работе предположение о близости значений спектральной излучательной способности на указанных длинах волн (650 нм и 862 нм) для данного материала при высоких температурах ( $\epsilon_{\lambda 1, \lambda 2} \approx 0,4$ ). На основании полученных результатов подготовлена и принята к публикации статья в журнале *Journal of Physics: Conference Series*. К сожалению, «Быстродействующей» осуществленную спектроскопию теплового излучения, к сожалению, назвать в нашем смысле нельзя в силу большой величины минимальной экспозиции спектрометра (1,05 мс), однако в проведенных экспериментах оказалось чрезвычайно полезной разработанная в ходе подготовки диссертации методика остановки нагрева при достижении заданной температуры.

Что касается оценки методической погрешности измерений температуры цветовым методом в 2%, сделанной на странице 90, то она опиралась на предполагаемую величину разницы излучательной способности на указанных длинах волн  $\Delta\epsilon_{1,2} = 0,03$ . Проведенные позднее измерения показали, что по порядку величины данное значение выбрано правильно, хотя и, возможно, несколько преуменьшено. Таким образом, данную оценку методической погрешности измерений температуры действительно можно считать несколько преуменьшенной, хотя и близкой к истине.

Наконец, оценка погрешностей, вызванных неравномерностью распределения значений температуры по длине образца и соответствующими этому распределению потерями с его поверхности, она представляющих несомненный интерес. Результаты моделирования, выполненного в ходе работы, отражено на слайде.

Технические особенности конструкции камеры высокого давления (малый диаметр смотровых окон около 5 мм) не позволяют визуалью с помощью быстродействующей камеры контролировать всю длину образца. Тем не менее, кадры свечения центральной части образца не обнаруживают неравномерности свечения, как это видно, например, на рисунке для образца из  $\text{MoC}_{0,82}$ . При попытке сместить область визирования камеры ближе к нижней цанге на кадрах начинают проявляться последствия виньетирования сигнала, что в свою очередь не позволяет оценивать равномерность свечения образца.

### **Председатель**

Спасибо, Роман Сергеевич. А вот теперь мы переходим ко второму оппоненту.

### **Скрипов П.В.**

Я бы прокомментировал ответы, кратенько. Это предусмотрено протоколом?

### **Председатель**

Вообще-то это в дискуссии, наверное?

### **Иосилевский И.Л.**

Нет, лучше сейчас.

### **Скрипов П.В.**

Я на минуту забегаю на чужое поле и сыграю за диссертанта. Дело в том, что эта работа,

эксперимент, она очень сложная. Когда я получил ее, сразу, моя шляпа была снята. Очень высокие скорости нагрева, и плюс измерение температуры пирометрами: несмотря на огромный задел, который был сделан в том числе в вашем институте, Лебедев, Савватимский, Коробенко, Шейндлин, я без имен-отчеств; понятно, что она базировалась на этом фундаменте, тем не менее, результат, который был получен, он совсем не был гарантирован, и на эту работу надо было решиться. Эта ее сложность, изначальная негарантированность успеха, ее обратная сторона состоит в том, что ты неизбежно подставляешься под большое количество вопросов, и здесь их можно задавать и мучить диссертанта, его руководителя сколько угодно. Поэтому я ответами полностью удовлетворен, особенно появлением дополнительных материалов, не вошедших непосредственно в текст диссертации. Все, сейчас я уже завершил.

### **Председатель**

Спасибо. Второй оппонент у нас Борис Борисович Хлевной.

### **Хлевной Б.Б.**

Если позволите, я не буду зачитывать текст отзыва.

### **Председатель**

Да, мы даже будем приветствовать.

### **Хлевной Б.Б.**

Скажу так, своими словами. И в диссертации, и в автореферате автор, обосновывая постановку своей работы, пишет, что системы тугоплавкие металл-углерод важны для такой-то, такой-то технологии, «и для метрологии». Вот я как раз представляю метрологию здесь. Я работаю в Институте Оптико-Физических измерений, это один из национальных метрологических институтов России, и мы занимаемся оптическими, как понятно из названия, измерениями, в том числе воспроизводим единицы спектральной яркости, освещенности, силы света, для чего используем высокотемпературные черные тела с температурами до 3500 К. В качестве материалов для таких черных тел мы используем графиты, и в частности пиролитический графит. И с этим связана одна из актуальных частей этой работы. То, что пиролитический графит имеет очень высокий коэффициент температурного расширения, мы знали из литературы для более низких температур, мы это чувствовали экспериментально, создавая свои черные тела, но в этой работе впервые подтверждены эти цифры, и, кстати, я был очень приятно удивлен, что мои примерные оценки были обоснованы наконец вот этой работой. Это одна из областей актуальности.

Вторая связана непосредственно с системами металл-углерод. Вы, наверное, знаете, что сейчас идет процесс переопределения Международной Системы единиц СИ. Осенью этого года будет принята новая система, которая вступит в силу примерно через год, в мае 19-го года. В том числе переопределяется температурная шкала, в частности ее высокотемпературная часть. В качестве реперных точек в температурную шкалу вводятся так называемые высокотемпературные реперные точки, основанные на эвтектических и перитектических фазовых переходах металл-углеродных соединений. Исследованию вот этих фазовых переходов, в основном, измерению температуры этих переходов, применительно к метрологической части были посвящены последние 15, может быть даже больше, около 20-ти лет некоторыми ведущими метрологическими институтами мира. В том числе, мы участвовали в этой работе. Мы были сосредоточены в основном на температуре фазового перехода и на воспроизводимости этой температуры. Для нас как для метрологов очень важна высокая повторяемость этого эффекта. Тем не менее вопросы остались, вопросы открыты, любой физический эффект может быть измерен с какой-то

точностью, неопределенностью, поэтому в рамках неопределенности остаются открытые вопросы, мы не понимаем, с чем связано некоторое несовпадение температура, скажем, материала, полученного в одной лаборатории, и в другой лаборатории, и я абсолютно уверен, что результаты вот этой работы помогут нам в будущем. Может быть, непосредственно, не мне, но моим последователям, последователям моих коллег в других лабораториях, когда мы будем стремиться повысить точности измерений, результаты этой работы, безусловно, будут использованы, и они поспособствуют пониманию процесса воспроизводимости фазового перехода в том числе. Что касается конкретно системы молибден-углерод, вот сейчас в рамках Росстандарта идут две опытно-конструкторские работы, связанные непосредственно с этой системой. Это интересно, потому что температура плавления этой системы равна 2856 К. В фотометрии черное тело с такой температурой называется фотометрический источник типа А. Исторически так сложилось, что выбрали эту температуру, и именно черное тело с этой температурой считается особо важным для фотометрии, и при калибровке фотометрического оборудования привязывают все к такому источнику типа А. Как раз вот этот материал молибден-углерод имеет температуру плавления 2856 К, и с этим связана поставленная работа, которая сейчас проводится, разработка вот такого черного тела на фазовом переходе с фиксированной температурой с использованием этого материала. Эта работа незакончена, она продолжается, и я уверен, что мы будем использовать результаты этой работы в нашей метрологической области. В целом, работа мне очень понравилась, показан очень высокий экспериментальный уровень, создана прекрасная установка, то есть я, как и первый оппонент, готов снять шляпу, это действительно очень хорошая работа и диссертант заслуживает присвоения звания кандидата физико-математических наук. Да, простите, у меня были замечания, я уже про это забыл, потому что на самом деле замечания незначительны по сравнению с общей оценкой работы, но из-за того, что я читал не три раза, а один, может быть, если б я прочитал больше, я бы первое замечание может и снял, нашел бы ответ на этот вопрос, но тем не менее, замечание связано с тем, что зонды, которые подводятся к образцу, не приводят ли они к какой-т погрешности или, по крайней мере, учтено ли влияние этих зондов при получении вот этих результатов. Ну и вторые замечания: есть некоторые неточности, связанные с оценкой погрешности, мне, как метрологу, это бросилось в глаза, в частности, в одном месте пишется, что погрешности измерения температуры плавления, это в главе первой, может быть оценена с точностью  $\pm 2\%$ , а в главе третьей приводится уже значение температуры плавления с точностью 28 К, что составляет 1%. То есть есть некоторые неточности, несовпадения, но, опять же, это несколько не умаляет достоинства работы.

### **Председатель**

Спасибо, Борис Борисович, я думаю, что нет вопросов к оппоненту? Тогда, пожалуйста, Роман Сергеевич, время для ответа

### **Беликов Р.С.**

Спасибо. Крепление потенциальных зондов к исследуемому образцу осуществлялось, в зависимости от типа проводимого эксперимента, двумя способами.

В первом случае в качестве измеряемого параметра выступал в первую очередь коэффициент термического расширения, а калорические параметры, такие как вложенная энергия (и, таким образом, сила тока, протекающего через образец и падение напряжения на нем), измерялись лишь со вспомогательными целями, для контроля правильности измерения температуры с использованием справочных данных по энтальпии исследуемого вещества. Такой подход имел место при исследовании КТР пирографита. В таком случае зонд из медной проволоки сечением 60 мкм обвязывался вокруг образца, механически на нем закрепляясь. Такой метод крепления, несомненно, будет оказывать заметное влияние

на увеличение погрешности измерений падения напряжения на образце, в первую очередь за счет неточности измерения расстояния между потенциальными зондами.

Во втором случае для крепления зондов к образцу использовался искровой разряд, возникавший в месте контакта, когда образец и зонд в процессе подготовки к эксперименту подсоединялись к заряженному конденсатору. Зарядка производилась с помощью стабилизированного источника питания до напряжения около 20 В. Разряд, возникающий в месте контакта, обеспечивал надежное механическое и электрическое соединение и позволял надежно измерить расстояние между потенциальными зондами. Такая методика применялась для точных калориметрических измерений, необходимых при работе с металлами и карбидами. К сожалению, эксперименты с пирографитом продемонстрировали трудности с реализацией такой методики применительно к графиту. Погрешность измерения расширения демонстрирует выраженную зависимость от диапазона измерений вследствие инструментальных особенностей такого измерения. Основной вклад в погрешность в данном случае вносил такой фактор как неточность фокусировки объектива камеры. Благодаря усреднению по большому числу горизонтальных рядов, кривая зависимости интенсивности падающего на ПЗС-матрицу излучения от горизонтальной координаты была гладкой функцией. Однако крутизна ее роста и падения на границах образца, т.е. величина ее производной, серьезно зависела от точности фокусировки объектива.

Кроме того, по очевидным причинам, погрешность определения относительного расширения напрямую зависела от величины абсолютного расширения образца, и менялась для разных температурных диапазонов в значительных пределах.

В главе 3 идет речь именно об измерении температуры плавления исследуемого образца. Точность в таком случае повышается за счет большого количества измерений на плато плавления и усреднения на данном плато показаний пирометра.

### **Председатель**

Спасибо, Роман Сергеевич. Ну, мне представляется ответ достаточным? Дискуссия. Кто хочет высказаться? Пожалуйста, Владимир Сергеевич.

### **Воробьев В.С.**

Работа выполнена в 2018 году, и звучит вполне актуально, современно, здесь уже об этом говорилось. Но меня «резануло» приближение, которое тут прозвучало, приближение «серого тела». Наш учитель Лев Михайлович Биберман пришел бы в неописуемую ярость от этого, дело в том, что это приближение совершенно необоснованно. То есть вы берете  $\sigma T^4$  и умножаете на коэффициент, ну или в каком-то спектральном интервале. Так никогда не бывает, потому что гораздо более разумное приближение, что некоторые компоненты радиационные, которые находятся в равновесии с излучением, излучают как черное тело, а другие компоненты, другой компонент излучения, выходит свободно из объема. Можно было взять как альтернативу коэффициент лучистой теплопроводности, потому что такая архаика, как приближение серого тела, я считаю, недостаток этой работы. Но он, по-видимому, несущественен, чтобы повлиять на общую высокую оценку этой работы.

### **Председатель**

А вот интересно, оппоненты не против были «серого» тела.

### **Скрипов П.В.**

Ну, мы были поставлены перед фактом.

### **Воробьев В.С.**

Нет, где-то было замечание.



**Председатель**

Нет, недостаточно обоснованно, но не против метода как такового.

**Иосилевский И.Л.**

Ну, это почти то же самое.

**Председатель**

Хорошо, еще есть какие-нибудь замечания, предложения, кроме того, что перейти к заключительной фазе? По-видимому, все достаточно ясно. Заключительное слово, Роман Сергеевич.

**Беликов Р.С.**

Я хотел бы поблагодарить членов совета за внимание к данной работе. Кроме того, я хотел бы поблагодарить оппонентов за то, что они проявили много усилий, чтобы эту работу рассмотреть и высказать свое мнение. И в заключение хотелось бы поблагодарить своего научного руководителя, собственно, благодаря которому все это и стало возможным.

**Председатель**

Игорь Львович (*Иосилевский, председатель счетной комиссии*), вы продемонстрировали неугасающую активность. Поэтому если Вы сможете увлечь членов комиссии за собой, то я бы оставил счетную комиссию в прежнем составе (*Кириллин Александр Владимирович*), только Васильева заменяем. Лев Гаврилович (*Дьячков*), будьте добры. Нет возражений? Приступаем к голосованию. Кто за? Возражений нет? (*Счётная комиссия выбирается единогласно*). Тогда прошу счётную комиссию приступить, а всех членов диссертационного совета проголосовать. (*Проводится процедура тайного голосования*).

**Председатель**

Уважаемые члены Совета! Давайте послушаем результаты.

**Иосилевский И.Л.**

Уважаемые члены Совета! Позвольте огласить протокол заседания комиссии. Состав диссертационного совета утвержден в количестве **31** человека. Дополнительно введены члены совета – **нет**. Присутствовало на заседании **23** члена совета, в том числе, докторов наук по профилю рассматриваемой специальности – **11**. Роздано бюллетеней – **23**, осталось не роздано – **8**, оказалось в урне бюллетеней – **23**.

Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Беликову Роману Сергеевичу:

**за – 23, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.**

**Председатель**

Спасибо. Мы должны утвердить теперь. Кто за? Против нет? Воздержавшихся нет? (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*).

Спасибо большое, поздравляем.

Переходим к обсуждению проекта заключения. Есть замечания, пожелания? (*Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения*). Если больше нет желающих обсуждать проект, тогда мы должны за него проголосовать с теми замечаниями, которые были высказаны. Кто за заключение с замечаниями, которые были указаны? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно. (*Проект заключения принят единогласно*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02, СОЗДАННОГО НА  
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 30.05.2018 протокол № 9

О присуждении Беликову Роману Сергеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование теплофизических свойств системы Мо-С эвтектического состава и графита при высоких температурах» в виде рукописи по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника, принята к защите 21.03.2018г., (протокол заседания № 5), диссертационным советом Д 002.110.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Беликов Роман Сергеевич 1989 года рождения, в 2012 году окончил Московский физико-технический институт (государственный университет).

В 2016 году окончил очную аспирантуру Московского физико-технического института (государственного университета).

Работает научным сотрудником лаборатории № 1.1.3 – Широкодиапазонных уравнений состояния НИЦ – 1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии.

Диссертация выполнена в лаборатории № 1.1.3 – Широкодиапазонных уравнений состояния НИЦ – 1 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории № 1.1.3 – Широкодиапазонных уравнений состояния НИЦ – 1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии Сенченко Владимир Николаевич.

Официальные оппоненты:

- д.ф.-м.н., профессор, в.н.с. лаборатории быстропротекающих процессов и физики кипения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а, тел. (343) 362-3353, itr.uran.ru, e-mail: pavel-skripov@bk.ru) Скрипов Павел Владимирович;

- к.т.н., начальник лаборатории радиометрии, фотометрии, спектрофотометрии и колориметрии некогерентного излучения научно-исследовательского отделения М-4

Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений» (119361, г. Москва, ул. Озерная, 46, тел. (495) 665-5291 доб. 3601, [vniiofi.ru](http://vniiofi.ru), e-mail: [vniiofi@vniiofi.ru](mailto:vniiofi@vniiofi.ru)) Хлевной Борис Борисович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск), в своем положительном заключении, составленном заместителем директора по научной работе, заведующим Отделом термодинамики веществ и излучений ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, доктором физико-математических наук, Станкусом С.В. (утвержденном директором ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, чл.-корр. РАН Марковичем Д.М.), указала что:

1. Разработана методика и создана установка для исследования теплофизических свойств материалов, в частности, твердых смесей карбидов различных составов при их объемном нагреве до предельно высоких температур.
2. Проведено экспериментальное исследование свойств системы Мо-С эвтектического состава, таких как: теплота плавления, удельная энтальпия, теплоемкость, термическое расширение и электросопротивление в области плавления в условиях высокого статического давления.
3. Выполнено экспериментальное исследование изобарного линейного расширения и плотности пиролитического графита при высоких температурах и в области предплавления.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования, например, в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Объединенном институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» и во многих других научных учреждениях.

Соискатель имеет 27 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 22 работы, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, опубликовано 9 работ.

#### Основные работы:

1. В.Н. Сенченко, Р.С. Беликов, «Установка для экспериментального исследования теплофизических свойств проводящих тугоплавких веществ в окрестности их точки плавления методом импульсного нагрева» // Известия Кабардино-Балкарского Государственного Университета, 2014, Т. 4 № 1, С. 22-26.
2. В.Н. Сенченко, Р.С. Беликов, В.С. Попов, «Экспериментальная установка для исследования поведения тугоплавких металлов в области предплавления при быстром нагреве» // Вестник Казанского технологического университета, 2014, Т. 17 № 21, С. 285-286.
3. Р.С. Беликов, И.К. Красюк, Т. Ринкер, А.Ю. Семенов, О.Н. Розмей, И.А. Стучебрюхов, М. Томут, К.В. Хищенко, "Отрицательные давления и откол в мишенях из графита при нано- и пикосекундном лазерном воздействии" // Квант. электроника, 2015, Т. 45 № 5, С. 421–425.

4. V.N. Senchenko, R.S. Belikov and V.S. Popov, «Experimental investigation of refractory metals in the premelting region during fast heating» // Journal of Physics: Conference Series, 2015, V. 653, P. 012100.
5. I.K. Krasnyuk, A.Yu. Semenov, I.A. Stuchebryukhov, R.S. Belikov, K.V. Khishchenko, O.N. Rosmej, T. Rienecker, A. Schoenlein and M. Tomut, «Investigation of the spall strength of graphite using nano- and picosecond laser pulses» // Journal of Physics: Conference Series, 2015, V. 653, P. 012002.
6. V.N. Senchenko, R.S. Belikov and V.S. Popov, «Experimental investigation of thermophysical properties of eutectic Mo—C, graphite and tantalum at high temperatures» // Journal of Physics: Conference Series, 2016, V. 774, P. 012020.
7. V.N. Senchenko and R.S. Belikov, «Experimental investigation of linear thermal expansion of pyrolytic graphite at high temperatures» // Journal of Physics: Conference Series, 2017, V. 891, P. 012338.
8. V.N. Senchenko and R.S. Belikov, «Experimental investigation of density of pyrolytic graphite up to melting point» // Journal of Physics: Conference Series 2018, V. 946, P. 012105.
9. R.S. Belikov, V.N. Senchenko and S.N. Sulyanov, «Experimental investigation of thermophysical properties of eutectic Re—C at high temperatures» // Journal of Physics: Conference Series, 2018, V. 946, P. 012106.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»** (доцент кафедры физических проблем материаловедения, старший научный сотрудник, к.т.н., Тенишев Андрей Вадимович) – отзыв положительный, с замечаниями:

- К сожалению, в автореферате соискатель не приводит экспериментальных фотографий, на основании которых производились расчеты термического расширения. Заявленная погрешность определения приращения длины в 10 % слишком велика по сравнению с возможностями современных дилатометров и рентгеновских аппаратов. Поэтому хотелось бы иметь возможность повышения точности определения данной характеристики с помощью предложенной в работе методики.

- В автореферате не представлена диаграмма состояния системы Mo-C и какое-либо ее обсуждение, а также практически не описаны процедуры подготовки экспериментальных образцов и их аттестации, что может служить источником дополнительных методологических ошибок.

**2. Национальный Исследовательский Университет МЭИ** (доцент кафедры Инженерной теплофизики МЭИ, старший научный сотрудник, к.т.н. Мирошниченко Владимир Иванович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- В автореферате не указано, на чем основано принятое приближение серого тела.

- Если данные о коэффициент излучения карбида молибдена отсутствуют, то интересно было бы получить такую информацию из проведенных в данной работе измерений яркостной температуры карбида молибдена.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Скрипов П.В. является ведущим ученым в области быстропротекающих процессов и физики кипения, признанным специалистом в области экспериментальной высокотемпературной теплофизики;

1. S.V. Rutin, D.A. Galkin, P.V. Skripov "Returning to classic conditions of THW-technique: A device for the constant heating power mode" // *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2017, V. 115, pp. 769-773;

2. П.В. Скрипов, В.С. Усков «Теплофизика быстропротекающих процессов» Учебное пособие // Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2014;

3. S.V. Rutin, A.D. Yampol'skiy, P.V. Skripov, "Heat transfer in supercritical fluids. Going to microscale times and sizes" // In: L. Chen, & Y. Iwamoto (Eds.), *Advanced Applications of Supercritical Fluids in Energy Systems*, 2017, Hershey, PA: IGI Global, pp. 271-291.

- к.т.н. Хлевной Б.Б. является признанным специалистом в области радиометрии, фотометрии, спектрофотометрии и колориметрии некогерентного излучения, ряд его публикаций связан напрямую с исследуемым в диссертации веществом MoC<sub>0,82</sub>.

1. A. Prokhorov, V. Sapritsky, B. Khlevnoy, V. Gavrilov "Alternative methods of blackbody thermodynamic temperature measurement above silver point" // *International Journal of Thermophysics*, 2015, V. 36, № 2-3, pp. 252-266;

2. В.Р. Гаврилов, Д.А. Отряскин, Б.Б. Хлевной, И.А. Григорьева, М.В. Солодилов, М.Л. Самойлов, В.И. Саприцкий «Измерение термодинамической температуры высокотемпературных реперных точек» // *Измерительная техника*, 2013, № 4, С. 53-57;

3. Y. Yamada, K. Anhalt, M. Battuello, P. Bloembergen, B. Khlevnoy, T. Wang, G. Machin, M. Matveyev, M. Sadli, A. Todd "Evaluation and selection of high-temperature fixed-point cells for thermodynamic temperature assignment" // *International Journal of Thermophysics*, 2015, V. 36, № 8, pp. 1834-1847.

Выбор Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в качестве ведущей организации обусловлен тем, что «ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН» является профильной организацией, проводящей обширные исследования, в том числе в области экспериментальной теплофизики. В институте, в частности, группой С.В. Станкуса, активно ведутся работы по изучению высокотемпературного теплового расширения тугоплавких веществ, в том числе графитов, что близко к тематике диссертационного исследования соискателя.

1. С.В. Станкус, И.В. Савченко, А.Ш. Агажанов, О.С. Яцук, Е.И. Жмуриков «Теплофизические свойства графита МПГ-6» // *Теплофизика высоких температур*. 2013. Т. 51. № 2. С. 205;

2. В.В. Кузнецов, И.А. Козулин, В.И. Орешкин, Н.А. Ратахин, А.Г. Русских «Динамика фазового взрыва при импульсном нагреве жидкости и электрическом взрыве проводника» // *Тепловые процессы в технике*, 2015, № 7, С. 301-306.

3. Р.Н. Абдуллаев, Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус «Плотность сплава калий–свинец эвтектического состава» // *Теплофизика и аэромеханика*, 2013, Т. 20, № 1, С. 89-94.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

- создана установка и разработана методика для изучения теплофизических свойств тугоплавких электропроводящих материалов в области высоких температур (1600-5000 К) и давлений (до 2 кбар) с возможностью прекращать нагрев образца при заданной температуре и варьировать скорости нагрева в пределах  $10^6$ - $5 \cdot 10^7$  К/с.

- измерены: изменение удельной энтальпии, удельная теплоемкость, теплота плавления, удельное сопротивление и коэффициент термического расширения системы  $\text{MoC}_{0,82}$  эвтектического состава вплоть до температуры плавления ( $T \approx 2860 \text{ K}$ ).

- получены новые данные по изобарному линейному расширению пиролитического графита в области температур 3300-4800 K.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

- получены данные по изменению удельной энтальпии, удельной теплоемкости, электросопротивлению, теплоте плавления и величине термического расширения  $\text{MoC}_{0,82}$ , а также линейному расширению пиролитического графита, которые могут быть использованы для составления справочников и теоретического моделирования;

- разработана методика экспериментального исследования теплофизических свойств тугоплавких электропроводящих веществ, позволяющая получать данные в труднодостижимом для стационарных методов диапазоне высоких температур и давлений.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- получены данные по удельной энтальпии, удельной теплоемкости, электросопротивлению, теплоте плавления и величине термического расширения  $\text{MoC}_{0,82}$ , а также линейному расширению пиролитического графита, которые могут быть использованы для решения прикладных теплофизических задач, в частности, в ядерной энергетике, авиакосмической отрасли и метрологии в ряде исследовательских институтов, связанных с данной тематикой.

Работы с эвтектическими системами, в частности с  $\text{MoC}_{0,82}$ , проводятся в таких метрологических организациях России и других стран, как Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Национальный метрологический институт Японии. Пиролитический графит широко используется в высокотемпературной технике. Следует упомянуть, например, практику использования плотного пиролитического графита в качестве материала тиглей для карбидных материалов, подвергающихся нагреву до жидкой фазы, при этом знание коэффициентов термического расширения пирографита является полезной и необходимой информацией для проектировщиков установок, осуществляющих подобный нагрев.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования, например, в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Объединенном институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» и др.

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила:

- проведена апробация созданной установки на материалах с известными теплофизическими свойствами (тантал и молибден), показана воспроизводимость результатов исследования;

- расчетно-теоретические исследования построены на известных, проверяемых данных, фактах, общепризнанных законах технической термодинамики, оптики и теплофизики. Они согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

- идея диссертационной работы базируется на анализе научно-технической литературы по предметной области исследования, обобщении передового опыта работы других научных групп, лабораторий и технологических компаний;
- использованы современные методы и приборы для исследования теплофизических свойств материалов, в том числе системы Мо-С эвтектического состава и графита;
- установлено качественное совпадение авторских результатов и представлений с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии в выборе темы исследования, постановке задачи. Диссертация написана автором лично. Положения, выносимые на защиту, сформулированы лично автором. Экспериментальная установка создана при определяющем участии автора. Экспериментальные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Апробация результатов исследования проводилась на более чем 13 российских и международных конференциях, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены лично автором.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 30.05.2018г. диссертационный совет принял решение присудить Беликову Р.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы» и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника», участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 23 против - 0 действительных бюллетеней - 0

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02  
д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

ВРИО ученого секретаря диссертационного совета Д 002.110.02  
д.ф.-м.н., профессор

Василяк Л.М.  
30.05.2018г.

