

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Фролова Александра Михайловича

«Исследование молекулярного состава паров сверхтугоплавких веществ методом лазерного испарения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Фролова А.М. посвящена исследованию испарения ряда веществ при сверхвысоких температурах в ранее недоступном диапазоне с помощью лазерного нагрева импульсами миллисекундной длительности.

Актуальность темы, выбранной Фроловым А.М. для его научно-квалификационной работы, обоснована необходимостью получения экспериментальных данных об испарении тугоплавких и сверхтугоплавких материалов в условиях экстремальных тепловых нагрузок.

Диссертация Фролова А.М. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 122 страницы.

Во *введении* автор формулирует актуальность темы своей научно-квалификационной работы, цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* дается краткий обзор развития экспериментального метода высокотемпературной масс-спектрометрии. Традиционные методы высокотемпературной масс-спектрометрии с применением стационарного нагрева, описанные в *разделе 1.1*, позволяют исследовать термодинамические характеристики испарения только до температуры 3200 К. Анализ молекулярного состава пара при более высоких температурах возможен с применением лазерного нагрева (*раздел 1.2*). В *разделе 1.3* описываются работы по испарению различных веществ с использованием наносекундных лазерных импульсов и основные недостатки их применения. *Раздел 1.4* посвящен подробному рассмотрению двух работ по исследованию молекулярного состава паров с применением лазерных импульсов миллисекундной длительности. Автор дает обоснование выбора этого метода нагрева для выполнения задач, поставленных в его диссертационной работе.

Во *второй главе* дается описание общего устройства экспериментальной установки, сконструированной для исследования. Автор описывает критерии выбора параметров лазера, яркостного пирометра и времяпролетного масс-спектрометра с точки зрения достижения оптимальных условий испарения и анализа молекулярного состава пара. Также Фроловым А.М. описаны

процедуры проведения эксперимента, обработки результатов и калибровки измерительных приборов.

В *главе 3* описаны результаты исследования сублимации графита. В *разделе 3.1* автор дает обзор работ по определению молекулярного состава пара графита, выполненных другими авторами. В *разделе 3.2* автор описывает процедуру выбора параметров эксперимента: темпа нагрева, энергии ионизирующих электронов и т.д. В *разделе 3.3* приведены основные экспериментальные результаты, полученные автором: молекулярный состав пара, определенный при испарении обеих плоскостей пирографита в диапазоне температур от 3450 до 4350 К, энтальпии сублимации основных компонентов пара.

Глава 4 посвящена исследованию испарения двух сверхтугоплавких керамик - карбидов циркония и гафния. В *разделе 4.1* приводятся некоторые физические свойства этих карбидов и данные работ по исследованию молекулярного состава их паров при температурах до 3300 К. В *разделе 4.2* автор описывает процедуры приготовления и анализа исследуемых образцов и выбор параметров эксперимента. В *разделе 4.3* даны основные экспериментальные результаты исследования молекулярного состава паров карбида циркония трех стехиометрических составов и карбида гафния одного стехиометрического состава при температурах от 3600 до 4500 К. Автор приводит температурные зависимости относительных парциальных давлений основных компонентов пара и их соотношения, а также их энтальпии испарения.

В *главе 5* автор приводит результаты исследования тугоплавкой керамики - диоксида циркония. Как следует из литературного обзора в *разделе 5.1* анализ молекулярного состава этого вещества в работах других авторов проводился только до температуры 2900 К. В *разделе 5.3* приведены результаты проведенного Фроловым А.М. исследования испарения диоксида циркония при температурах от 2750 до 3300 К. Автором получены температурные зависимости относительных парциальных давлений компонентов пара, рассчитаны соотношения основных компонентов пара, а также соотношение атомов кислорода и циркония.

В *Заключении* формулируются наиболее значимые результаты диссертационной работы.

Научная новизна. В диссертационной работе Фролова А. М. представлены первые экспериментальные результаты анализа молекулярного состава пара при испарении обеих плоскостей пиролитического графита до температур 4350 К. Автором, также впервые, было исследовано испарение сверхтугоплавких карбидов циркония и тантала и диоксида циркония в окрестности точек плавления этих веществ. Все эксперименты выполнены на пределе имеющихся в настоящее время технических возможностей с использованием самой современной аппаратуры.

Диссертационная работа содержит все необходимые формальные разделы и дает достаточно полное представление о проведенных исследованиях. Полученные автором результаты обладают несомненной научной новизной и практической ценностью и необходимы для прогнозирования поведения материалов при экстремально высоких температурах. Они могут быть использованы в научных организациях Российской академии наук, предприятий атомной и ракетно-космической промышленности: АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", РКК "Энергия", АО "ЦНИИМАШ" и т.д.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных автором в ходе подготовки его диссертационной работы представлены на 20ти конференциях и опубликованы в 7 статьях в рецензируемых журналах, 4 из которых входят в список ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Исходя из текста диссертационной работы можно заключить, что она выполнена при определяющем участии Фролова А. М.

Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что в области исследованных ранее температур они хорошо стыкуются с имеющимися данными.

Вместе с тем по диссертации Фролова А. М. имеются некоторые замечания и вопросы:

1. Как показано главе 2, в ходе лазерного нагрева, в области размером около 300 мкм, распределение температур близко к однородному. Однако, автор не указывает, из какой области поверхности регистрируются испаряющиеся частицы.
2. Автор выполняет калибровку яркостного пирометра до температуры около 3350 К, но не указывает как проверялась линейность оптоэлектрической системы пирометра в диапазоне температур выше 3500 К, в котором было выполнена часть измерений и к каким погрешностям приводит экстраполяция калибровки в область температур выше 4000 К.
3. Автор приводит планки погрешностей на графиках относительных давлений компонентов пара (например, на Рисунке 3.11), однако не указывает, как были рассчитаны эти погрешности.
4. В третьей главе автор приходит к выводу о том, что пиролитический графит испаряется в квази-свободномолекулярном режиме до температуры 4350 К. Однако, в работе не приведены предположения или заключения о режиме испарения других исследованных веществ - карбидов циркония и гафния, а также диоксида циркония. Можно ли утверждать, что испарение этих веществ в условиях эксперимента происходит также в квази-свободномолекулярном режиме?

5. В разделе 4.2.1. отсутствует описание технологии приготовления порошка карбида гафния.
6. В разделе 5.2 сказано, что для нагрева образцов двуокиси циркония использовался CO₂ лазер, который даже не упомянут в описании эксперимента.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления от работы Фролова А. М.

Общее заключение. Научно-квалификационная работа, представленная Фроловым Александром Михайловичем к защите имеет законченный характер и обладает несомненной научной ценностью.

На основании изложенного можно заключить, что диссертация «Исследование молекулярного состава паров сверхтугоплавких веществ методом лазерного испарения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Фролов Александр Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составлен официальным оппонентом, высококвалифицированным главным научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института Российской академии наук, доктором физико-математических наук Пикузом Сергеем Александровичем.

Официальный оппонент

д.ф.-м.н.,
главный научный сотрудник
отдела физики высоких плотностей энергии
ФГБУН ФИАН

23.11.2021



Пикуз С.А.

г. Москва, Ленинский пр-т. 53с13, к. 47 +7(499) 132-66-68 pikuzsa@lebedev.ru

Ученый секретарь ФИАН РАН
д.ф.-м.н.



Колобов А.В.

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, (499) 132-69-78,
kolobov@lebedev.ru.