

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора по науке

АО «Центральный научно-
исследовательский институт
машиностроения»,

доктор технических наук

А.А. Романов

« 09 » ноября 2021г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Фролова Александра Михайловича на тему «Исследование молекулярного состава паров сверхтугоплавких веществ методом лазерного испарения», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Для отзыва представлена квалификационная работа, состоящая из введения, пяти глав и заключения. Объём работы составляет 122 страницы, в том числе 48 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 88 наименований.

Работа Фролова А.М. посвящена исследованию перехода конденсированной фазы ряда сверхтугоплавких веществ в газовую фазу и разработке новых методов экспериментального исследования характеристик веществ в диапазоне сверхвысоких температур $T \geq 4000\text{K}$, ранее не исследованном. Рассмотрены пары графита, карбидов циркония и гафния и диоксида циркония. Эти материалы, в частности, перспективны для применения в качестве теплозащитных покрытий в ракетно-космической технике, диоксид циркония может использоваться в качестве антиэрозионного покрытия лопаток газовых турбин и пр., что определяет **актуальность исследования.**

Расширение границ применимости рассматриваемых веществ ограничивается отсутствием стандартных технических средств для определения их свойств. В экстремальных условиях эксплуатации устройств с применением таких веществ одним из основных свойств является скорость перехода его конденсированной фазы в жидкую и газовую фазы, теплота сублимации, а также состав паров. В то же время стандартные методы

исследований по целому ряду причин применимы только до температур не превышающих 3200 К.

В представленной работе расширение температурного диапазона исследований перечисленных свойств высокотемпературных материалов достигается путём использования в качестве нагревателя импульсного лазерного излучения.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, описаны научная новизна работы, а также ее теоретическая и практическая значимость, отмечен личный вклад автора.

В первой главе дан обзор существующих методов определения молекулярного состава паров при высоких температурах и обоснование экспериментального метода, выбранного для исследований в диссертационной работе.

Во второй главе приведена схема экспериментальной установки, сконструированной для исследований, дано обоснование выбора ее параметров, описаны необходимые процедуры калибровок, процессы обработки результатов.

В третьей главе приведены основные экспериментальные результаты исследования сублимации пиролитического графита. Автор показывает, что при заданных экспериментальных условиях испарение происходит в квазиленгмюровском режиме. Приведены полученные в работе значения энтальпий сублимации основных компонентов пара и соотношений их давлений при испарении базисной и призматической плоскостей пирографита до температуры 4350 К.

В четвертой главе автор приводит основные результаты экспериментального исследования испарения карбидов циркония и гафния при температурах свыше 3600 К. Подробно проанализирован молекулярный состав паров этих карбидов: рассчитаны соотношения основных компонентов пара. Показано, что большую долю в паре составляют молекулы C_2 и C_3 , причем их появление в газовой фазе скорее всего объясняется испарением самого карбида, а не возможной примеси свободного углерода. В работе также показано, что соотношение атомов углерода и циркония в паре карбида циркония с повышением температуры стремится к одному значению независимо от стехиометрии исходного образца.

В пятой главе приведены результаты анализа молекулярного состава пара диоксида циркония в двух сериях экспериментов с существенно отличающимися условиями и показано, что измеряемые соотношения

давлений компонентов пара определяются только температурой поверхности. По результатам экспериментов рассчитаны энтальпии испарения основных компонентов пара и соотношение атомов кислорода и циркония в паре.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна проведенных автором экспериментальных и численных исследований заключается в следующем:

1. Разработана методика экспериментального измерения молекулярного состава паров при испарении сверхтугоплавких материалов, существенно расширяющая диапазон исследуемых температур (до 4500 К).
2. Создана экспериментальная установка для исследования испарения сверхтугоплавких веществ методом времяпролётной масс-спектрометрии с лазерным нагревом миллисекундными импульсами, которая существенно расширяет диапазоны исследуемых параметров (температуры до 4500 К и давления до 1 атм).
3. Усовершенствованы и внедрены методы высокоскоростной диагностики – метод времяпролётной масс-спектрометрии и метод оптической пирометрии.
4. Впервые при высоких температурах (до $T \sim 4350$ К) в широком диапазоне давлений определены основные характеристики сублимации пирографита. Измеренные энтальпии сублимации, а также определённые соотношения давления компонентов пара (C_1 , C_2 и C_3) в целом подтверждают результаты термодинамических расчётов (JANAF и ИВТАНТЕРМО).
5. Впервые получены экспериментальные данные по испарению карбидов циркония и гафния, в том числе и из жидкой фазы при температурах выше 3700 К.

Научная значимость результатов исследований обусловлена тем, что разработанный метод исследований, созданная экспериментальная установка и модернизированные средства измерений существенно расширяют диапазон исследуемых параметров испарения сверхтугоплавких материалов и базу данных по термодинамическим параметрам таких материалов.

Полученные результаты и выводы являются достоверными и обоснованными.

Практическая ценность результатов состоит в том, что экспериментальные данные о составе паров пирографита могут быть использованы при разработке термохимической модели разрушения углеродных материалов при экстремальных режимах их функционирования. Экспериментальные результаты по молекулярному составу паров при испарении карбидов циркония и гафния необходимы для разработки

теоретических моделей их поведения в условиях экстремальных тепловых нагрузок.

Результаты работы могут быть использованы в организациях аэрокосмической отрасли (АО «ЦНИИмаш», ФГУП «ЦАГИ», АО «ВПК «НПО машиностроения», ПАО «РКК «Энергия», АО «НПО Лавочкина» и др.).

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, представлены на более чем 20-ти российских и международных конференциях.

Публикации

По теме работы автор имеет 7 статей в рецензируемых журналах, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК.

Личный вклад автора

Не вызывает сомнения, что большая часть работы выполнена автором самостоятельно или при его определяющем участии.

Замечания и пожелания.

Поскольку, как показывает автор, режим испарения пирографита квази-ленгмюровский, следовало бы наряду с приведенными соотношениями для давлений основных компонентов рассчитать и привести значения коэффициентов испарения всех наблюдаемых в эксперименте компонентов пара графита C₁-C₅.

Для остальных исследуемых веществ – карбидов циркония и гафния - автору следовало бы также рассчитать и привести долю основных компонентов в паре, поскольку эти данные будут полезны для моделирования испарения указанных веществ при высоких температурах.


Эти замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему. Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне, её научные положения и выводы достаточно обоснованы. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах. Таким образом, диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 постановлений «Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842) и «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским

диссертациям, а ее автор Фролов Александр Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 –«Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании подсекции Научно-технического совета № 2-1 комплекса «Теплообмен и аэрогазодинамика» АО «ЦНИИмаш», протокол от 21.10.2021г. № 21.

Отзыв составил
Главный научный сотрудник,
доктор физико-математических наук, профессор  В.В. Лунёв

141074, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, 4.
8 (495)513-45-61, E-mail: lunev_vv@mail.ru

И.о. главного ученого секретаря
АО «ЦНИИмаш»,
доктор технических наук  В.Ю. Ключников

141074, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, 4.
Тел: 8 (495) 513-50-19, E-mail: KlyushnikovVY@tsniimash.ru

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», 141074, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, 4.
Тел.: 8 (495) 513-59-51. Факс: 8 (495) 512-21-00, E-mail: corp@tsniimash.ru