

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

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного
института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул.
Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 8 декабря 2021 г. (протокол № 30)

Защита диссертации Фролова Александра Михайловича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
**«Исследование молекулярного состава паров сверхтугоплавких
веществ методом лазерного испарения»**

Специальность 1.3.14 - теплофизика и теоретическая
теплотехника

Москва – 2021

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (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 № 30 от 8 декабря 2021 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом № 105/нк Минобрнауки РФ 11 апреля 2012г., редакция Приказ № 1046/нк от 15 октября 2021г. Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в количестве 30 человек. На заседании присутствуют 23 человека, из них очно: 6 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 4 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 7 докторов наук по специальности 1.3.14 – 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 – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
2	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
3	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
4	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
12	Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.14	Присутствует
13	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
16	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
17	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Присутствует
18	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
19	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
20	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
21	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
22	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
23	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
24	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
25	Савватимский А.И.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	1.3.14	Присутствует
26	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
27	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
28	Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
29	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
30	Яньков Г.Г.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.9	Подключен

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 1.5 – экстремальных энергетических воздействий Отдела №1. - физики экстремальных состояний Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Фролова Александра Михайловича** на тему «Исследование молекулярного состава паров сверхтугоплавких веществ методом лазерного испарения». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 1.5 – экстремальных энергетических воздействий Отдела №1. - физики экстремальных состояний ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Научный руководитель:

Шейндлин Михаил Александрович – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией № 1.5 - экстремальных энергетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Столярова Валентина Леонидовна – гражданка РФ, д.х.н., профессор, член-корреспондент РАН, профессор кафедры общей и неорганической химии, Институт химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского государственного университета» (Институт химии СПбГУ, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский проспект, дом 26,)

Пикуз Сергей Александрович - гражданин РФ, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник отдела физики высоких плотностей энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им.П.Н. Лебедева РАН (ФИАН, г. Москва, Ленинский проспект, д.53)

Ведущая организация:

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО ЦНИИМАШ, г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4)

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.х.н., профессор Столярова В.Л.(дистанционно) и д.ф.-м.н. главный научный сотрудник ФИАН Пикуз С.А., научный руководитель Фролова А.М. д.ф.-м.н. Шейндлин М. А.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Уважаемые коллеги, мы переходим к следующему заседанию. Вторая защита у нас. Фролов Александр Михайлович. Он здесь присутствует. И Михаил Михайлович можете ознакомить нас сейчас с необходимыми документами.

Ученый секретарь

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

Председатель

Спасибо, Михаил Михайлович. Если вопросов нет, тогда переходим к защите по существу. Александр Михайлович, пожалуйста, Вам 20 минут.

Фролов А.М.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Фролова А.М. прилагается).

Председатель

Спасибо, Александр Михайлович. Пожалуйста, вопросы у соискателю у кого возникли?

Вараксин А.Ю.

Александр Михайлович, вот вопрос. Вы нам рассказывали об ограничениях метода, который вы используете. Там была такая фраза у вас, что одним из ограничений является взаимодействие облака пара и летящих частиц. Поясните, что это за частицы и как вы их там наблюдали, вносили ли они возмущения в вашей работе.

Фролов А.М.

Речь идет как раз, если мы возьмем пирографит или углерод, о тех компонентах, которые испаряются с поверхности. То есть когда образуется паровое облако достаточной плотности из этих частиц, летящие следом за ним могут вступать во взаимодействие с этим паровым облаком, что приводит к этому самому «эффекту насыщения». Здесь я это демонстрировал. То есть у нас фактически начинает падать сигнал, хотя ожидается дальнейший его рост.

Вараксин А.Ю.

То есть это те же частицы?

Фролов А.М.

Да это те же частицы.

Вараксин А.Ю.

Эти частицы какого размера? Это макро частицы?

Фролов А.М.

Нет, это атомы и молекулы, испаряемого вещества.

Председатель

Еще, пожалуйста. Да, Александр Викторович?

Еремин А.В.

У меня в каком-то смысле, в этом же направлении вопрос. Хорошо известный факт, что основная компонента, вылетающая при испарении графита, это C_3 . Термодинамически это достаточно хорошо объясняется. А вот как с точки зрения кинетической? Вот у вас рвется вот эта гексагональная решетка. Вылетает атом и потом рекомбинирует, или сразу вылетают молекулы. Или они рекомбинируют уже в струе.

Фролов А.М.

Нет, судя по тому, что мы наблюдаем свободномолекулярный режим испарения, то есть мы наблюдаем непосредственно то, что вылетает с поверхности. В процессе отрыва молекулы, может происходить перестроение химических связей, но вылетает уже именно частица C_3 .

Еремин А.В.

То есть рвется гексагон – сразу отрывается C_3 .

Фролов А.М.

Не могу сказать это точно: нельзя сделать вывод на основании моих измерений.

Председатель

Еще вопросы, пожалуйста.

Амиров Р.Х.

У меня вопрос следующий. Вы когда говорите об углероде, вы упоминаете, что есть термодинамические расчеты ИВТАНТЕРМО, соответственно. Когда вы переходите к этим сложным карбиду циркония и оксиду циркония, я так понимаю, там уже нельзя принципиально применять законы термодинамики, потому что вы не знаете, как при испарении происходит обеднение по кислороду и так далее. Правильно, я понимаю.

Фролов А.М.

Да, действительно, уже нельзя учесть в этом случае изменение состава поверхности, поскольку у нас испарение в вакуум, оно далеко не равновесное. Тут у меня приведены результаты некоторых расчетов из базы данных. Но, опять же, это равновесные данные.

Амиров Р.Х.

То есть применительно к испарению таких соединений, как диоксид циркония, термодинамика вам ничем не может помочь.

Фролов А.М.

Боюсь, что да.

Амиров Р.Х.

Спасибо.

Васильев М.М.

У меня экспериментальный к вам вопрос. Насколько сильно влияют продукты дегазации стенок в ходе эксперимента на масс-спектральные измерения. Водород, какие-то пары масла, может быть, вода.

Фролов А.М.

Спасибо за вопрос. На самом деле, я опускаю многие экспериментальные сложности. Преимуществом метода лазерного испарения является то, что мы за очень короткое время испаряем очень большое количество вещества. Еще испаряемый образец у меня находится близко к камере масс-спектрометра, поэтому значительная часть паров попадает в верхнюю камеру. И, соответственно, фоновые масс-спектры не нужно учитывать, потому что они перекрываются по интенсивности всеми этими компонентами пара. Особенно это актуально при испарении диоксида циркония, потому что можно сказать, что атомарный и молекулярный кислород уже был в камере. На самом деле, проводились измерения фоновых масс-спектров и интенсивность остаточного атомарного кислорода существенно меньше, то есть никакого влияния нет. При испарении деградации стенок не происходит, по причине того, что никакого взаимодействия с парами не происходил. Они испаряются и просто оседают на стенке. Так как их очень мало, они даже их не нагревают. И еще высокий вакуум у нас обеспечивается при откачке турбомолекулярными насосами, поэтому остаточных паров масла у нас там нет.

Председатель

Спасибо, еще вопросы есть?

Гавриков А.В.

На одном из первых слайдов вы указали ограничение эффузионной ячейки в 3200 К. Не могли бы вы пояснить, почему такое именно число, потому что, казалось бы, оно должно зависеть от материала и вы тоже разные материалы использовали. Это первый вопрос. А второй – вы не могли бы дополнительно пояснить, как вы гарантировали точность измерения температуры поверхности.

Фролов А.М.

Спасибо за вопросы. По поводу метода КЭМС, по поводу этой температуры, действительно, верхний предел применимости будет зависеть от вещества. Для каждого конкретного вещества этот метод может применяться до определенной температуры. Связано это и с возможными реакциями, и с тем, что давление насыщенных паров вещества превысит некоторое значение, насколько помню, 10 Па. Эту температуру я написал, как некий верхний предел, выше которого подняться невозможно с помощью этого метода. Связано это с тем, что для ячейки Кнудсена, мы можем использовать только самые тугоплавкие материалы. Это тантал, вольфрам. В самом лучшем случае, это будет вольфрам. При применении вольфрама выше этой температуры уже начнется взаимодействие с ним любого исследуемого вещества, и это взаимодействие начнет нарушать наши измерения. Это, как я сказал, верхний предел. Что касается измерения температуры, точность определения обеспечивается, во-первых, выполнением всех процедур калибровки тщательным образом. Во-вторых, при лазерном испарении встает вопрос о распределении температуры в пятне нагрева. Было экспериментально измерено и также здесь приведены результаты расчета этого распределения для профиля мощности,

используемого в моем эксперименте. Было показано, что распределение, как видно из данного графика, в пятне нагрева равномерное. То есть это обеспечивает также высокую точность определения температуры поверхности. Также точность определения температуры обеспечивалась проверкой линейности электронно-оптической системы пирометра, которая проводилась отдельно и мы можем утверждать, что выходной сигнал пирометра линеен во всем диапазоне исследуемых температур – до 5000 К, для данного пирометра. Я достаточно ответил на Ваш вопрос?

Гавриков А.В.

Да-да, спасибо.

Председатель

Еще вопросы?

Дороватовский А.В.

Приведено распределение температур по радиусу. Как гарантируется то, что наблюдаемый масс-спектр относится, как я понимаю, к верхней точке этого распределения, а не к какой-нибудь другой, правее или левее.

Фролов А.М.

Меня уже спрашивали, какое влияние вот этого отрезка, где температура отличается от температуры в центре. Действительно, поскольку интенсивность испарения и скорость испарения экспоненциально зависят от температуры, то влияние вот этого участка будет невелико. Тут скорее вопрос, из какого участка я снимаю масс-спектры и анализируется испарение. Были проведены отдельные измерения путем смещения лазерного пучка относительно оси масс-спектрометра и было показано, что испарение пятна размером около 400 мкм как раз и определяет выходной сигнал масс-спектрометра. То, что мы все измеряем адекватно, подтверждается совпадением данных по энтальпиям испарения с результатами других групп и с результатами термодинамических предсказаний. И опять же стоит упомянуть, что поскольку у меня совпадают измеренные парциальные давления, измеренные на относительно медленном нагреве и на быстром охлаждении, то это позволяет утверждать, что какого-то влияния распределения температур у нас нет, вне пятна нагрева.

Председатель

Достаточно широкая область равномерного нагрева, так можно сказать?

Фролов А.М.

Да.

Председатель

Спасибо, если больше вопросов нет, то Михаил Александрович, Ваше слово об Александре Михайловиче.

Шейндлин М.А.

Там уже есть формальный отзыв, поэтому я скажу несколько неформальных слов. В общем, та задача, которая была изобретена для Александра Михайловича, она была с моей

стороны чистой воды авантюрой, потому что, когда такая задача была сформулирована, я понимал, что сделать это невозможно. Но, тем не менее, набрать материал для диссертации можно было и, в общем, вот эти мои предположения Александр Михайлович опроверг просто своей очень системной работой за ряд лет. И как мы, наверное, убедились сегодня, удалось сделать очень много и удалось сделать даже то, чего я не предполагал. Например, вот работа, которая была связана с испарением двух поверхностей пирографита, и совпадение данных с пересчетом на разные коэффициенты испарения, это огромное достижение, я считаю, которое показывает действительно, что этот метод работает и работает до огромных ранее недостижимых температур. Вот конечно то, что Александр Михайлович сделал благодаря его каждодневной, очень четкой, системной работе, это, считаю, его очень большое достижения. Конечно, этого нельзя было сделать без какой-то помощи сотрудников лаборатории, но его вклад здесь более чем решающий. Он по существу единолично сделал эту работу. По-моему, из моего выступления все ясно. Ко мне есть вопросы?

Председатель

Я не думаю. Спасибо, Михаил Александрович. Мне кажется, тут понятно. Вы достаточно полно характеризовали соискателя. Значит теперь выступления Михаила Михайловича со всеми имеющимися в деле отзывами.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, на автореферат Александра Михайловича поступило два отзыва. Оба отзыва положительные, но как всегда не обошлось без замечаний. **Первый отзыв** пришел из Института металлургии и материаловедения РАН. Подписан он **Казенасом Евгением Константиновичем**, доктором технических наук, заведующим аналитической лаборатории. И к автореферату имеются следующие замечания.

В части автореферата, посвященной результатам исследования диоксида циркония, не указывается влияние остаточного кислорода и воды в вакуумной камере на результаты измерений, хотя такое влияние может быть существенным. В автореферате автор не указывает, как получены исследуемые образцы карбидов циркония и гафния, количество примесей в образцах.

Второй отзыв пришел из Физического института имени Лебедева, подписан, главным научным сотрудником **Савиновым Сергеем Юрьевичем**, доктором физ.-мат. наук, профессором. Отзыв положительный с замечанием:

В работе упоминается максимальная температура, при которой наблюдается насыщение сигнала масс-спектрометра при испарении пирографита. Остается неясным, является ли это значение температуры границей применимости экспериментального метода, использованного в работе.

Тем не менее, отзывы положительные и подписавшие считают, что соискатель заслуживает присуждения ему искомой степени. В качестве **ведущей организации** выступал **Центральный научно-исследовательский институт машиностроения**. С вашего позволения я не буду зачитывать весь отзыв, остановлюсь только на структуре его и замечаниях, которые сформулированы. Во-первых, отзыв содержит описание объема и структуры диссертации. Отмечается научная новизна и научная значимость работы, ее практическая ценность, а также публикации и личный вклад автора, и апробация, которую прошла работа. Вместе с тем, сформулированы ряд **замечаний**:

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 C_1 - C_5 .

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

Вместе с тем делается вывод, что эти замечания не снижают общей высокой оценки сделанной работы. Отзыв составлен **Луневым В.В.**, главным научным сотрудником, доктором физ.-мат. наук, профессором и утвержден **Романовым А.А.**, первым заместителем генерального директора.

Председатель

Спасибо, Михаил Михайлович. Александр Михайлович, пожалуйста.

Фролов А.М.

(Первый отзыв) Что касается давления остаточного кислорода и воды, я уже отвечал на этот вопрос. Их влияние несущественно, потому что интенсивность потока паров настолько высока, что остаточные пары влияния никакого не оказывают. Таким образом, благодаря этому методу мы можем измерять полный состав пара, включая атомарный кислород и молекулы O_2 .

(Второй отзыв) Касаемо границы применимости метода, да действительно эффект насыщения, ограничивает применимость метода в том смысле, что выше некоторой температуры результаты, которые мы получаем, они уже могут быть не столь разумны, не столь точны. Однако, это не означает, что мы не можем нагреть вещество дальше. В некоторых случаях мы можем посмотреть его поведение, поведение молекулярного состава его пара при существенно более высоких температурах. Что касается пирографита, то мне удавалось нагреть его предположительно до точки плавления и посмотреть, как там будут вести себя отдельные молекулярные компоненты, которые еще не уходят в насыщение. Но в целом можно говорить, что для получения термодинамически значимых результатов есть такая граница.

Касательно отзыва ведущей организации, то могу согласиться, что эти данные по коэффициентам испарения всех компонентов пара надо просчитать и привести. Они будут полезны для моделирования. И данные по соотношениям давлений основных компонентов пара, их, думаю, я приведу в каких-нибудь свои работах.

Председатель

Спасибо, мы переходим к заслушиванию мнений официальных оппонентов. Сергей Александрович, Вам первое слово, пожалуйста.

Пикуз С.А.

Добрый день, коллеги. Прежде всего, работа мне понравилась. Я ее прочитал с интересом. Хотя она находится немножко в стороне от основной моей специальности. Я действительно получил много новой информации. Это во-первых. Во-вторых, как и любая работа, которая делается на пределе возможностей, она уже даже этим фактом

заслуживает внимания. Эта работа действительно сделана на пределе возможностей, то есть тогда, когда получаются результаты, которые ранее не известны. Поэтому кажущаяся на первый взгляд перегрузка текста обзорами, которые там существуют в каждой главе, объясняется именно тем, что автор просто вынужден стыковать свои результаты с теми, которые были до того. И тем самым, может быть уверенным в том, что результаты, которые получает автор, они действительно соответствуют истине. То есть, тот самый пункт, что требуется формально, что надежность должна быть доказана чем-то.

Председатель

Достоверность.

Пикуз С.А.

Да, достоверность результатов. Вот это формулировка, которая всегда есть. Здесь она не просто так дана, а именно, действительно этим подтверждена. Есть, конечно, некоторые недостатки, на которые, кстати, он фактически уже ответил и уже эти **вопросы** возникали, связанные, прежде всего, с измерениями температуры, то есть определением той зоны, в которой температура меряется и определение линейности этих измерений, фактически экстраполяции этих данных в зону той самой неизвестности. Но автор уже **фактически на них ответил**, потому что они возникали. Второй вопрос о доказательстве существования этого свободномолекулярного режима для всех элементов. Потому что этот режим подробно обсуждается для углерода, а дальше он употребляется как бы по дефолту, то есть вроде бы он есть и все. Но, наверное, его можно было бы обсудить более подробно. И пара технических таких замечаний. Во-первых, не описана технология приготовления образцов из карбида гафния. Для другого элемента – циркония, она описана подробно, а вот это как бы есть и все. И, наконец, тоже по тексту. Когда читаешь, вдруг, в какой-то момент появляется СО₂-лазер. То есть вся работа фактически сделана для лазера на гранате и вдруг написано, что для вот этого использовался СО₂-лазер. Тут надо сказать, что известно, что взаимодействие СО₂-излучения с веществом оно вообще кардинальным образом часто отличается от взаимодействия видимого света. Но вот этот вот факт он проскакивает мимо и никак не обсуждается. Но в целом работа, безусловно, заслуживает того, чтобы автор получил искомую степень. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Вот все.

Председатель

Спасибо, Сергей Александрович. Думаю, что вопросов тут нет. И поэтому можем перейти к мнению второго оппонента. Это Столярова Валентина Леонидовна. Она из Санкт-Петербурга и будет у нас по Зуму.

Столярова В.Л.

Здравствуйте, глубокоуважаемые коллеги, глубокоуважаемый Николай Евгеньевич, глубокоуважаемые члены ученого совета. Мне хотелось бы от души поблагодарить за приглашение, для меня почетное. Свой отзыв мне хотелось бы частично зачитать и отметить наиболее значимые моменты, которые, на мой взгляд, еще не были отмечены ни в вопросах, ни в обсуждении данной работы. Первое, на что мне очень хотелось бы обратить внимание, что рассматриваемое диссертационное исследование продолжает лучшие традиции отечественной научной школы по высокотемпературной масс-

спектрометрии, которая создана в вашем институте признанным в мире лидером в этой области профессором Львом Николаевичем Гороховым, который является не только основоположником высокотемпературной масс-спектрометрии в вашем институте, но и в нашей стране в целом. И особенно мне хотелось бы подчеркнуть, что в данной работе впервые в отечественной практике поставлена и очень корректно решена задача изучения процессов испарения и термодинамических свойств до температуры 4500 градусов сверхтугоплавких веществ. Как вы уже знаете, углерода, карбидов циркония и гафния, а также диоксида циркония. И яркой особенностью, на мой взгляд, проведенного исследования является создание уникальной экспериментальной установки, которая сочетает потенциальные возможности времяпролетной масс-спектрометрии и лазерного нагрева. Причем, мне хотелось бы подчеркнуть, что это первая отечественная установка такого типа. В начале своего доклада Александр Михайлович показал нам четыре установки, существующие в мире. Две из них я имела возможность видеть, и в 89м году в Национальном институте стандартов и технологий в лаборатории Джона Хэсти мы эту установку видели. Многие-многие годы моим коллегами и мне конечно, достигая температуры 3000 К, получая экспериментальные данные, очень хотелось подняться выше. Но такую установку нам создать не удалось и вот она реализована. Теперь она есть в нашей стране, и открывает большие потенциальные возможности, как термодинамических исследований, так и для широкого спектра практических применений. В тексте отзыва существует традиция описывать содержание каждой главы диссертации. Данная диссертация состоит из пяти глав. Причем, на мой взгляд, распределение информации, которая предлагается читателю, сделано очень глубоко продуманно и очень значимо. И диссертацию читать действительно очень интересно. Далее мною будет сделано замечание, что не все монографии, которые традиционно считаются классическими в высокотемпературной масс-спектрометрии, особенно отечественные упомянуты в диссертации. Но, что приятно, в обзорных работах и в этих монографиях, все источники, которые имеются в настоящее время в литературе, они все, тем не менее, в диссертации упомянуты. Проведена исключительно большая работа не только экспериментальная, но и работа с литературой на высоком методическом, научном уровне. Далее в отзыве мною описывается содержание всех пяти глав и отличительной особенностью этого описания является то, что в каждом третьем предложении упомянуто слово впервые. Действительно, в этой работе для высокотемпературной масс-спектрометрии очень многое сделано впервые. Причем, впервые не просто получены экспериментальные данные, а именно термодинамически значимые экспериментальные данные. И вот из четырех перечисленных имеющих в мире аналогичных приборов, которые не имеют аналогов в нашей стране, только лишь в одной, самой первой были получены достоверные, хорошие термодинамические данные. Далее все последующие работы носили более качественный характер по информации, больше склоняясь к кинетическим исследованиям, а вот данные для равновесной термодинамики там носят дискуссионный характер. Эта работа строго выполнена согласно всем канонам традиционным классическим законам высокотемпературной масс-спектрометрии и высокотемпературной химии, с точки зрения термодинамики. Мне хотелось бы обратить еще внимание на такой факт, описанный в пятой главе, что впервые была идентифицирована новая газообразная молекула Zr_2C . Ранее такой молекулы никто не видел и вот это небольшое открытие, оно как-то прошло в предыдущих обсуждениях незамеченным. Очень было мне приятно читать пятую главу, где шло обсуждение

традиционного высокотемпературного материала – диоксида циркония, широко применяемого, и как аккуратно, бережно автор попытался сравнить свои данные с ранее полученными данными, имеющимися в многочисленных работах по высокотемпературной масс-спектрометрии, выполненных традиционным масс-спектрометрическим эффузионным методом Кнудсена. Как всякое диссертационное исследование, данная диссертация не лишена недостатков и мне приятно было отметить, что работа написана прекрасным языком, она не имеет каких-то погрешностей с точки зрения стиля, логики изложения. Тем не менее, я позволила себе сделать некоторые замечания, которые носят в значительной степени рекомендательный характер и сильно надеюсь, что они будут полезны автору в дальнейшей работе. Так, согласно принятым канонам, принято, конечно, в диссертациях ссылаться на монографии, которые предшествовали тому или иному научному исследованию. В нашей стране имеется много хороших монографий по высокотемпературной масс-спектрометрии, в отличие от зарубежных, надо сказать. Было бы хорошо (**первое замечание**), если бы в этой работе были упомянуты монографии Льва Николаевича Горохова, Германа Александровича Семенова, моего научного руководителя Льва Николаевича Сидорова, Евгения Константиновича Казенаса, который дал отзыв на автореферат данной диссертации. И особенно мне конечно было обидно, что последняя монография Евгения Константиновича Казенаса, изданная в 2017 году, которая называется «Испарение карбидов», которая является уникальным, как я считаю, научным трудом по карбидам (не такой аналогичной монографии в мире), не была упомянута в данной работе. Далее замечания такого характера дискуссионного. (**второе замечание**) На страницах 57 и 74 использован термин потенциал ионизации. Но сейчас потенциал ионизации термин, не одобренный Международной комиссией по чистой и прикладной химии, и принято использовать термин «энергия ионизации». Далее (**третье замечание**) в оглавлении и в тексте диссертации и, в частности, на 68й странице и на некоторых других отсутствует указание о масс-спектрах или о термодинамических свойствах каких соединений идет речь при изложении текста. И, когда читаешь таблицу и подписи к рисункам, конечно, это вызывает некоторый дискомфорт, но это не влияет на высокое качество работы. Далее (**четвертое замечание**) на странице 16 в формуле 4 рассмотрена лишь прямо пропорциональная связь между коэффициентами испарения и неравновесным давлением пара. Но, в настоящее время, современная термодинамика уже традиционно использует формулы Уитмена-Моцфельда и формулу Комлева, которая более корректна, для того, чтобы рассматривать эти соотношения. Мне думается, что в дальнейших расчетах и для сравнения результатов классического метода Кнудсена и испарения с открытой поверхности, будут приняты во внимание эти пожелания. Говоря о диоксиде циркония (**пятое замечание**), который я уже упоминала, конечно, было несколько обидно, что коэффициент испарения диоксида циркония, который был впервые определен в нашей лаборатории в конце 70х годов Германом Александровичем Семеновым и Алексеем Николаевичем Беловым, не был использован в данной работе. Это позволило бы более корректно сравнить результаты, полученные в нашей лаборатории впервые, с данными, которые получены автором настоящего исследования. И заключение: необходимо подчеркнуть, что результаты данной работы имеют несомненную научную новизну и исключительную практическую значимость. Завершая свое выступление, мне хотелось бы еще обратить внимание на то, что с проблемами конструирования высокотемпературных приборов для масс-спектральных исследований я знакома не понаслышке. И мне удалось

самой участвовать в создании и выполнить модификацию двух приборов на базу квадрупольного масс-спектрометра: один до температуры 1200 градусов с однокамерной ячейкой Кнудсена, а второй – до 2000 градусов, с многокамерным испарителем для проведения аналогичных исследований. С этими проблемами я лично сталкивалась, и поэтому у меня есть глубочайшее уважение к выполненной работе, поскольку понимаю, сколько подводных камней таила в себе эта работа. Это позволило автору, несмотря на все трудности, добиться очень позитивного результата и получить значимые экспериментальные данные. Мне кажется, что эти исследования имеют большие перспективы как в нашей стране, так и за рубежом. Мне очень приятно быть оппонентом на этой работе. Большое спасибо!

Председатель

Валентина Леонидовна, спасибо большое за разносторонний анализ и я думаю, что Александр Михайлович должен с благодарностью принять Ваши замечания относительно неполноты списка литературы и будет использовать это замечание в дальнейшей работе. На другие вопросы, на которые Вы считаете возможным ответить, ответьте, пожалуйста.

Фролов А.М.

Валентина Леонидовна, спасибо большое за те данные, которые могут быть полезны для адекватного представления моих результатов в дальнейшем. Со **всеми замечаниями (второго оппонента)** я **согласен**, потому что они являются ценными для моей работы и для ее должного представления. Что касается вопросов **(первого оппонента)**. **Вопрос (первый)** был об изготовлении образцов у предыдущего оппонента, Сергея Александровича. На него я могу ответить, что все образцы карбидов гафния и циркония были приготовлены в нашей лаборатории моим коллегой Сергеем Петуховым методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Касательно содержания примесей, в них содержалось до 1 процента массового кислорода и азота. Это основные примеси, которые могут вносить какие-то возмущения в результаты. **(второе замечание первого оппонента)** Свободномолекулярный режим для всех веществ помимо пирографита предполагается по следующим причинам. Во-вторых, давление их паров существенно меньше, чем давление паров графита в моем исследовании, это демонстрируется на данном графике. Во-вторых, это опять же сохранение линейности графиков парциального давления компонентов. По поводу CO₂-лазера **(третье замечание первого оппонента)**, то согласен, его стоило упомянуть в описании эксперимента, но так как результаты экспериментов с его использованием согласуются с результатами испарения ИАГ-лазером, то мы считаем, что его воздействие на вещество в нашем случае неотличимо, идет только нагрев поверхности.

Председатель

Спасибо, Александр Михайлович. Пожалуйста, у нас время для дискуссии. Кто хочет?

Савватимский А.И.

Мы в своей работе занимаемся взрывом проводников на той стадии, когда можно исследовать вещества в жидкой фазе и плавление. Поэтому работы, которыми занимается Александр Михайлович идут параллельно – лазерный нагрев, и у нас – токовый нагрев. И

у той и у другой методики есть преимущества и ограничения. Но я должен сказать, что с работой Александра Михайловича, я встретился впервые серьезно в 17ом году в Граце на конференции, где у Александра Михайловича был свой доклад и у меня свой. И я видел, что доклад Александра Михайловича хорошо принят в Европе, и он является готовым специалистом, хорошего международного уровня и это приятно, потому что при любом противостоянии Запада и Востока, наука она едина. И в этой науке, работа Александра Михайловича в каком-то смысле уникально и никто этого сделать еще не мог. Новизна тут безусловна. Я считаю, надо поддержать эту работу.

Председатель

Спасибо. Пожалуйста, какие еще есть мнения, предложения, замечания. Если нету, тогда мне представляется это является отражением того, что ситуация понятна, относительно того, что работа новая, интересная и важная. Поэтому мы можем перейти к голосованию. Но еще заключительное слово перед голосованием.

Фролов А.М.

Я хотел бы, прежде всего, сказать спасибо за внимание к моей работе. Спасибо диссертационному совету. Спасибо моим оппонентам, которые смогли уделить время для рассмотрения моей работы. Хотел бы особое спасибо сказать, моему научному руководителю Шейндлину Михаилу Александровичу за постоянное внимание к работе. Льву Николаевичу Горохову - за его консультации по методу высокотемпературной масс-спектрометрии, Брыкину Михаилу Владимировичу – за критические замечания и критическое отношение к работе, Григорию Евгеньевичу Беляеву – за помощь в освоении экспериментальной техники, всем сотрудникам лаборатории 1.5, без которых эта работа, безусловно, не состоялась бы, и моей жене Фроловой Дарье - за моральную поддержку.

Председатель

Спасибо. Так мы переходим к голосованию. И в связи с тем, что у нас часть людей присутствует удаленно, мы не выбираем счетную комиссию – голосуем электронно.

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги! Мы переходим к голосованию.
(Проводится процедура голосования).

Уважаемые коллеги, все члены Диссертационного совета проголосовали! Всего на этом заседании присутствовало **23** человека, из них очно – **12**, и онлайн – **11** человек. Докторов наук по профилю диссертации – **13**. Все **единогласно проголосовали** за присуждение искомой степени. Мы должны утвердить.

Председатель

Прошу утвердить протокол голосования! Кто за? Все, утверждаем, единогласно. Поздравляем!

Ученый секретарь

Теперь соискателю просьба внимательно послушать замечания и рекомендации по проекту заключения Диссовета. (Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения). Если есть замечания и пожелания? Если нет, тогда предлагаю принять с указанными замечаниями за основу. (Проект заключения принят единогласно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01
(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 08.12.2021 г. № 30

О присуждении Фролову Александру Михайловичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование молекулярного состава паров сверхтугоплавких веществ методом лазерного испарения» по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 05.10.2021г., (протокол заседания № 17) диссертационным советом 24.1.193.01 (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.(ред. 1046/нк от 15.10.2021г.)

Соискатель Фролов Александр Михайлович 1990 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 1.5 – Экстремальных энергетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2017 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Диссертация выполнена в лаборатории № 1.5 – Экстремальных энергетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией 1.5 Экстремальных энергетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Шейндлин Михаил Александрович.

Официальные оппоненты:

- доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН, профессор кафедры общей и неорганической химии Института Химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного университета Столярова Валентина Леонидовна;

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Отдела физики высоких плотностей энергии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им.П.Н. Лебедева Российской академии наук Пикуз Сергей Александрович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (г. Королев) в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником, д.ф.-м.н., профессором Луневым В.В. (утвержденном 09.11.2021 первым заместителем генерального директора по науке, доктором технических наук Романовым А.А.) указала, что научная значимости работы обусловлена тем, что разработанный метод исследований, созданная экспериментальная установка и модернизированные средства измерений существенно расширяют диапазон исследуемых параметров испарения сверхтугоплавких материалов. Научная новизна

работы заключается в том, что впервые при высоких температурах (до 4350 К) в широком диапазоне давлений определены основные характеристики сублимации пирографита, а также получены первые экспериментальные данные по испарению карбидов гафния и циркония при температурах свыше 3700 К.

Результаты работы могут быть использованы в научных организация Российской академии наук, а также в организациях аэрокосмической отрасли (АО «ЦНИИМАШ», ФГУП «ЦАГИ», АО «ВПК «НПО Машиностроения», ПАО «РКК «Энергия», АО «НПО Лавочкина» и др.).

Соискатель имеет 3 опубликованных работы по теме диссертации в реферируемых журналах из списка ВАК, 20 тезисов в сборниках трудов конференций:

1. *Вервикишко П.С., Фролов А.М., Шейндлин М.А. Анализ компонент паров карбида циркония при температурах выше 3500 К* // Физическое образование в ВУЗах. 2016. Т. 22, № 1С. Р. 86С-87С.

2. *Бгашиева Т.В., Вервикишко П.С., Фролов А.М., Шейндлин М.А. Кристаллизация углерода из пара при давлениях до 0,6 ГПа* // Физическое образование в ВУЗах. 2016. Т. 22, № 1С. Р. 88С-90С.

3. *Belyaev G.E. et al. Detection of trace impurities by time-of-flight mass spectrometry with laser-induced evaporation* // High Temp. 2017. Vol. 55, № 1. Р. 57–62. (Беляев Г. Е., Васин А. А., А. В. Лисицин А. В., Фролова А. М., Шейндлин М. А. Использование времяпролетной масс-спектрометрии с лазерно-индуцированным испарением для детектирования малых примесей // ТВТ. 2017, т. 55, в. 1, с. 61–67.)

На диссертацию и автореферат поступили два отзыва:

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Металлургии и Материаловедения РАН** (зав. Аналитической лабораторией д.т.н. Казенас Евгений Константинович) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в части автореферата, посвященной результатам исследования диоксида циркония не указывается влияние остаточного кислорода и воды в вакуумной камере на результаты измерений, хотя такое влияние может быть существенным.

- в автореферате автор не указывает, как получены исследуемые образцы карбидов циркония и гафния, количество примесей в образцах.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН** (главный научный сотрудник, профессор, д.ф.-м.н., профессор Савинов Сергей Юрьевич) – отзыв положительный, с замечанием:

- в работе упоминается максимальная температура, при которой наблюдается насыщение сигнала масс-спектрометра при испарении пирографита. Остается неясным, является ли это значение температуры границей применимости экспериментального метода, использованного в работе.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- чл.-корр. РАН, д. х. н., профессор Столярова Валентина Леонидовна является ведущим ученым в области термодинамики и высокотемпературной химии оксидных систем, а также крупным специалистом по применению высокотемпературной масс-спектрометрии для исследования испарения тугоплавких веществ и соединений.

1. *Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Lopatin S.I., Shugurov S.M., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Masaki K., Costa D. Vaporization and thermodynamics of the Cs₂O–MoO₃ system studied using high-temperature mass spectrometry* // Rapid Communications in Mass Spectrometry, Том 35, № 12, с. e9097, 2021

2. *Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Lopatin S.I., Shugurov S.M., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Masaki K., Costa D. High-temperature mass spectrometric study of vaporization and thermodynamics of the Cs₂O-B₂O₃ system: Review and experimental* // Rapid Communications in Mass Spectrometry, Том 35, № 11, с. e9079, 2021

3. *Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Masaki K., Costa D. High-temperature mass spectrometric study of thermodynamic properties in the UO₂-ZrO₂ system* // Rapid

- д.ф.-м.н. Пикуз Сергей Александрович является признанным специалистом в области физики высоких плотностей энергии и исследованиях быстропотекающих электровзрывных процессов.

1. Pikuz S.A., Parkevich E.V., Medvedev M.A., Khirianova A.I., Ivanenkov G.V., Agafonov A.V., Selyukov A.S. Mingaleev A.R., Shelkovenko T.A., Oginov A.V. Investigation of a Near-Electrode Plasma Formed in the Atmospheric Discharge with Employment of Picosecond Laser Probing // Journal of Russian Laser Research, T. 40, с. 56-63, 2019
2. Pikuz S.A., Parkevich E.V., Medvedev M.A., Selyukov A.S., Khirianova A.I., Mingaleev A.R., Mishin S.N., Setup involving multi-frame laser probing for studying fast plasma formation with high temporal and spatial resolutions // optics and lasers in engineering, T. 116, № 1, с. 82-88, 2019
3. Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Elshafiey A., Hammer D.A. Time-resolved investigation of subnanosecond radiation from Al wire hybrid X pinches // Physical Review E, T. 102, № 6, с. 063208, 2020

- Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (г. Королев) является профильной организацией, специализирующейся на проектировании концепций ракетно-космической техники, исследовании надежности и безопасности изделий ракетно-космической техники. Специалисты центра теплообмена и аэрогазодинамики осуществляют исследовательские работы по обеспечению наземной экспериментальной отработки ракетно-космической техники.

1. Кусов А.Л., Лунев В.В. О волнах разрежения при испарении материала в вакуум и малоплотную среду // Известия РАН. Механика жидкости и газов, № 2, с. 111-122, 2020
2. Кузнецов А.А., Лунев В.В. Нагрев тонкого острого клина в сверхзвуковом потоке // Известия РАН. Механика жидкости и газов, № 4, с. 115-119, 2021
3. Лунев В.В., Тихоничев П.С. Течение в узком канале с химическими реакциями на стенке. // Известия РАН. Механика жидкости и газов, № 4, с. 119-122, 2019

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- показано, что с помощью предложенной экспериментальной методики удастся реализовать квази-свободномолекулярный режим испарения и проанализировать молекулярный состав пара исследуемых веществ в недостижимом ранее диапазоне температур – до 4500 К.
- обнаружено, что при высоких температурах сохраняется особенность испарения пиролитического графита – значительная разница в значениях парциальных давлений основных компонентов пара над базисной и призматической плоскостями. Данное отличие может быть адекватно объяснено с привлечением коэффициентов испарения, измеренных в других работах при низких температурах.
- отношения давлений основных компонентов пара углерода (C_1 , C_2 и C_3) при максимальных температурах, достигнутых в эксперименте, в целом подтверждают результаты термодинамических расчетов в окрестности тройной точки углерода.
- обнаружено, что при испарении жидкого карбида циркония соотношение атомов углерода и циркония в паре с ростом температуры стремится к одному значению, независимо от исходного стехиометрического состава образца.
- экспериментально показано, что карбиды циркония и гафния при испарении в окрестности точки плавления, в том числе жидкой фазы, имеют схожий молекулярный состав пара, как по представленным компонентам, так и по их соотношениям. При этом показано, что существенная доля в парах этих карбидов приходится на молекулы C_2 и C_3 .
- показано, что испарение диоксида циркония в окрестности точки плавления, в том числе из жидкой фазы, происходит неконгруэнтно: отношение количества атомов кислорода и циркония в паре существенно превышает это значение для конденсированной фазы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- полученные в работе экспериментальные результаты о составе пара при сублимации базисной и призматической плоскостей пиролитического графита могут быть использованы для уточнения результатов термодинамических расчетов и моделирования испарения углерода в области вблизи точки его плавления.
- экспериментальные результаты по испарению карбидов гафния и циркония необходимы для моделирования поведения этих веществ при экстремально высоких температурах и в условиях воздействия высокоэнергетических потоков.
- используемый в работе экспериментальный метод позволяет исследовать молекулярный состав пара тугоплавких веществ в более широком по сравнению с аналогичными работами диапазоне температур.

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

- полученные в работе данные об испарении сверхтугоплавких карбидов циркония и гафния, а также углерода нужны для прогнозирования поведения конструкционных материалов атомной энергетики, а также теплозащитных материалов, эксплуатируемых при экстремальных тепловых нагрузках.
- полученные в работе данные о молекулярном составе пара диоксида циркония при температурах вблизи его точки плавления необходимы для уточнения термодинамических данных о системе U-Zr-Fe-O, являющихся ключевыми для моделирования аварийных ситуаций с расплавлением активной зоны ядерного реактора.
- предложенный экспериментальный метод может быть использован для исследования испарения тугоплавких систем, для анализа выхода газообразных компонентов из конструкционных материалов, а также анализа примесного состава образцов.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах (НИТУ МИСИС, НИЦ «Курчатовский институт», ИМЕТ РАН, ОИВТ РАН, ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ), а также в организациях ракетной-космической и атомной отраслей, в частности, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», АО «ЦНИИМАШ», ФГУП «ЦАГИ», АО «ВПК «НПО Машиностроения», ПАО «РКК «Энергия», АО «НПО Лавочкина».

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность полученных результатов подтверждается проведением измерений на современном поверженном оборудовании, анализом погрешностей измерений, согласием результатов с экспериментальными результатами и результатами термодинамических расчетов, выполненных другими авторами. Продемонстрирована хорошая воспроизводимость результатов в сериях экспериментов с одинаковыми условиями.

Личный вклад соискателя состоит в определяющем участии его в разработке методики проведения эксперимента, а также методов сбора и обработки экспериментальных данных, конструировании экспериментальной установки. Автором лично проведены все эксперименты, обработаны экспериментальные данные, проведена интерпретация полученных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 20 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Соискатель Фролов Александр Михайлович согласился с замечаниями, ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию и обоснования.

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

На заседании от 08.12.2021г. диссертационный совет принял решение присудить за

решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, присудить Фролову Александру Михайловичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника;

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 23 человек, из них очно: 6 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 4 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 7 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 30 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 23, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н.

Васильев М.М.

08.12.2021 г.

