



Акционерное общество

**МИТ «КОРПОРАЦИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

Березовая аллея, д. 10, Москва, Россия, 127273  
Телефон: (499) 907-37-74, Телефакс: (499) 907-37-29;  
e-mail: mitemail@uamail.ru

Председателю диссертационного  
Совета Д 212.125.08 на базе  
«Московского авиационного  
института»  
д.т.н., профессору Равиковичу  
Ю.А.

125993, г. Москва, Волоколамское  
шоссе, д. 4

от 03.12.2020 № 3/822-313

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



Уважаемый Юрий Александрович!

Направляем Вам отзыв ведущей организации на диссертационную работу Зубко Анны Александровны «Тепло- и массообмен на каталитически активной поверхности высокоскоростного летательного аппарата планирующего класса», представленной в диссертационный совет Д212.125.08 на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Приложение: отзыв 2 экз, на 7 л. каждый.

Заместитель  
генерального конструктора

В.И.Петрусев

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«04 12 2020»



020161



Акционерное общество

**МИТ «КОРПОРАЦИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

Березовая аллея, д.10, Москва, Россия, 127273  
Телефон: (499) 907-37-74, Телефакс: (499) 907-37-29;  
e-mail: mitemail@uamail.ru

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель  
генерального директора  
и генерального конструктора



А.А.Дорофеев

« \_\_\_\_\_ » МОСКВА 2020 г

от 03.12.2020 № 3/Р22-313

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Зубко Анны Александровны «Тепло- и массообмен на каталитически активной поверхности высокоскоростного летательного аппарата планирующего класса», представленную на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертация Зубко Анны Александровны «Тепло- и массообмен на каталитически активной поверхности высокоскоростного летательного аппарата планирующего класса» посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию процессов тепло- и массообмена на материалах высокоскоростных летательных аппаратов при реализации взаимодействия диссоциированных и ионизированных газовых потоков с поверхностью конструкций, которые обладают каталитической активностью.

#### Актуальность темы диссертации

Одной из наиболее важных и сдерживающих проблем при создании

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«04» 12 2020



020160

высокоскоростных летательных аппаратов с продолжительным временем работы является вопрос стойкости материалов в окислительной среде, когда поверхности конструкции взаимодействуют с диссоциированным или ионизированным воздушным потоком. При полете таких аппаратов в плотных слоях атмосферы пограничный слой потока, обтекающего конструкцию, становится химически активным, его структура существенно усложняется, что существенно изменяет механизмы взаимодействия с поверхностью летательного аппарата как в тепловом, так и в эрозионном плане. Возникает необходимость совместного учета физико-химических процессов, реализуемых в газовой фазе и на поверхности материала. Проведение таких исследований открывает путь к созданию новых вариантов тепловой защиты, которые обеспечат функционирование создаваемых конструкций в течение заданного времени и в заданных условиях. Таким образом тема диссертации является актуальной.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы заключается:

- в экспериментально-теоретическом исследовании физико-химических процессов гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности;
- в разработке математической модели, описывающей процессы в химически активном пограничном слое на каталитически активной поверхности;
- в модификации используемого в практике проектирования уравнения Л. Гуларда для расчёта тепло - и массообмена на каталитически активной поверхности, обоснование достоверности полученного модифицированного уравнения;
- в реализации в лабораторных условиях методов и средств улучшения каталитических свойств новых термостойких композиционных материалов тепловой защиты;

- в предложении и апробации метода и средств улучшения каталитических свойств углерод-углеродных материалов за счет нанесения на них тонкослойных металлокерамических покрытий.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы заключается:

- в создании математической модели, позволяющей с высокой точностью рассчитывать процессы теплообмена на поверхности конструкции высокоскоростного летательного аппарата с учетом гетерагенного катализа;
- в разработке метода и средств получения термостойких углерод-углеродных материалов с необходимыми каталитическими свойствами путём формирования на их поверхности тонких композиционных металлокерамических покрытий с использованием мелкодисперсных сверхзвуковых низкотемпературных гетерогенных потоков.

### **Общие сведения о диссертационной работе**

Диссертационная работа Зубко А.А. состоит из введения, пяти глав, заключения, списков условных обозначений и цитируемой библиографии. Работа представлена на 145 страницах основного текста, включающего 30 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 95 наименований.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние и суть проблемы тепло-массообмена при полёте высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) в плотных слоях атмосферы. В таких условиях пограничный слой на поверхности ЛА меняет свою структуру, а также термогазодинамические состояние, что интенсифицирует процесс теплообмена. Интенсивность этого процесса зависит от массы, высоты и скорости полёта ВЛА, а также каталитической активности материала его поверхности. Для решения задач химической кинетики автором использованы два механизма реализации гетерогенной каталитической реакции: механизм Или-Райдилла и механизм Ленгмюра – Хиншельвуда.

Проведён широкий анализ тепло- и массообмена в ламинарном «замороженном» пограничном слое, рассмотрены процессы присущие равновесному пограничному слою и сделан вывод о независимости теплового потока в стенку, обладающей абсолютной каталитической активностью и обтекающей диссоциированным газом, от химического состояния пограничного слоя.

Во второй главе проведён анализ физико-химических аспектов гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности. Выделены физическо-химические факторы, определяющие интенсивность тепломассообмена в химически активном пограничном слое на каталитически активной поверхности. Подробно исследован механизм гетерогенных экзотермических химических реакций. Показано влияние поверхностной микроструктуры материалов условий эксплуатации ВЛА на их каталитические свойства, и на уровень теплового потока в каталитически активную поверхность.

В третьей главе работы представлена общая математическая модель тепло - и массообмена на каталитически активной поверхности головной части ВЛА. Для описания процессов термогазодинамики и тепломассообмена в предложенной математической модели уравнение энергии учитывает распределение энергии по модам: поступательной, колебательной и вращательной. Такой подход позволил более строго оценивать термогазодинамические и теплофизические свойства определяющих компонентов химически активного пограничного слоя.

Достаточно подробно проведен анализ реализации кинетики химических реакций в сжатом и пограничном слоях при полёте ЛА в атмосфере с гиперзвуковой скоростью. Анализ кинетики химических реакций проведён с учётом энергообмена между степенями свободы (модами). Показано, что в случае гетерогенного катализа внутренняя энергия атомов сосредоточена главным образом в поступательной и вращательной модах. Это отличает предложенную математическую модель от моделей, используемых ранее.

Представлены результаты расчётов, полученных с использованием предложенной математической модели, и их анализ.

В четвертой главе проанализирована математическая модель расчёта теплообмена на каталитически активной поверхности с использованием широко применяемых в настоящее время алгебраических критериальных соотношений. В частности рассмотрено алгебраическое критериальное соотношение Гуларда. Проведённое в диссертационной работе сопоставление расчетных данных, полученных Гулардом с данными настоящей работы с использованием модифицированных соотношений, полученных автором, и экспериментальными данными, показало значительное, до 40%, несоответствие результатов. Это указывает на тот факт, что допущения, сделанные Гулардом при выводе критериальных соотношений далеки от реальных процессов, реализуемых на поверхности аппарата при полёте с гиперзвуковой скоростью.

Глава пять диссертационной работы посвящена анализу возможностей улучшения термостойкости и каталитических свойств углеродных композиционных материалов теплозащитного назначения. С этой целью при выполнении данной диссертационной работы разработана и апробирована технология формирования на поверхности теплонапряжённых элементов конструкции ГЛА, выполненных из УУКМ, тонких (~100мкм) термостойких композиционных покрытий. Технология формирования таких покрытий разработана на базе использования низкотемпературных сверхзвуковых гетерогенных потоков. Твёрдая фаза таких потоков составлялась путём введения в базовую композицию присадков в виде порошков разных редкоземельных высокотемпературных элементов.

С использованием указанной технологии на стенде МАИ получены следующие термостойкие композиционные покрытия:  $Si - Ti - Mo - B$ ,  $Si - Ti - Mo - Cr$ ,  $Si - Ti - Mo - B - Y$ ,  $Si - Ti - Mo - Cr - B - Al$ , коэффициент каталитической активности которых при температуре поверхности  $T_w > 2500$  К не превышал 1 м/с.

### **Рекомендации по использованию материалов диссертации**

Результаты диссертационной работы носят практическую ценность для предприятий и организаций, занимающихся разработкой и эксплуатацией гиперзвуковых летательных аппаратов.

### **Замечания по содержанию диссертации**

Несмотря на достаточно высокий уровень, диссертационная работа не лишена недостатков, к которым можно отнести следующие:

1. В работе проведено недостаточно широкое сопоставление расчётных данных, полученных с использованием предложенной математической модели и данных, опубликованных в научной печати.

2. В работе проведены экспериментальные исследования только трёх типов защитных покрытий. Оценки показывают, что для перспективных ЛА необходимо будет использовать композиционные покрытия с более высокой термостойкостью (до уровня температур 2700 К – 2900 К, хотелось бы понять существует ли такая возможность).

3. По таблице 7 в главе 5, где приводятся результаты определения каталитических свойств углерод-углеродных материалов с защитными покрытиями делается вывод, что наиболее оптимальными являются покрытия Si – Ti – Mo – B – Y – Al и Si – Ti – Mo – B – Y – Hf не до конца понятно на основании чего сделан такой вывод.

4. Из работы в целом не ясно, какие использовались теплофизические характеристики материалов при выполнении расчетов.

Отмеченные замечания недостатки не снижают положительной оценки диссертационной работы и не влияют на ее основные результаты.

### **Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней**

Диссертация Зубко А.А. является научно-квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых научных результатов и решений технических задач по исследованию, как процессов каталитической активности материалов, так и технологий получения термостойких покрытий с низкой каталитической активностью.

Работа написана технически грамотным языком, содержит логически стройный материал. Автореферат и публикации в полном объеме отражают содержание, выводы и результаты работы. Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Зубко Анна Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Отзыв на диссертационную работу Зубко А.А. обсужден и одобрен на заседании секции НТС отделения 3 АО «Корпорация «МИТ», протокол № 10 от 03.12.2020

Заместитель  
генерального конструктора,  
кандидат технических наук

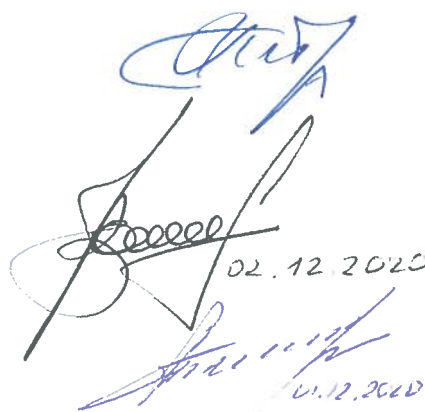
В.И.Петрусев

Заместитель  
начальника отделения,  
кандидат технических наук

Е.Н.Волков

Начальник лаборатории,  
кандидат технических наук

А.А.Тихонов



Петрусев Виктор Иванович 127273 Москва, ул. Березовая аллея, 10, АО «Московский институт теплотехники», тел. (499) 231-42-30.

Волков Евгений Николаевич 127273 Москва, ул. Березовая аллея, 10, АО «Московский институт теплотехники», тел. (499) 202-58-63.

Тихонов Андрей Анатольевич 127273 Москва, ул. Березовая аллея, 10, АО «Московский институт теплотехники», тел. (499) 231-46-81.

*С отзывами ведущей организацией университета.*

*Проф. Зубко А.А.*  
04.12.2020