

На правах рукописи



**Зубко Анна Александровна**

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН НА КАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА ПЛАНИРУЮЩЕГО КЛАССА**

Специальность 01.04.14  
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ  
**Никитин Пётр Васильевич**

Официальные оппоненты: **Алексеев Алексей Кириллович**, доктор физико-математических наук, публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева», главный научный сотрудник.

**Горский Валерий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, акционерное общество "Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения», начальник лаборатории.

Ведущая организация: **Акционерное общество "Корпорация "Московский институт теплотехники"**

Защита состоится «21» декабря 2020г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

[https://mai.ru/upload/iblock/c5c/Dissertatsiya\\_Zubko-A.A..pdf](https://mai.ru/upload/iblock/c5c/Dissertatsiya_Zubko-A.A..pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертации.**

В настоящее время огромный научный и практический интерес вызывает проблема аэродинамического нагрева летательных аппаратов (ЛА) при полёте в плотных слоях атмосферы планет со сверхзвуковой скоростью.

Сущность проблемы связана с изучением процессов термогазодинамики и теплообмена, сопутствующих обтеканию диссоциированными и ионизированными газовыми потоками элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) многократного использования, поверхности которых обладают каталитической активностью.

Отличительная особенность таких ЛА выражается в том, что при полёте в плотных слоях атмосферы Земли первостепенное значение начинают играть не только классические процессы термогазодинамики и теплообмена в пограничном слое, но и процессы химтермодинамики. Пограничный слой становится химически активным. Его термодинамическое состояние (равновесный, неравновесный, «замороженный») и структура существенно усложняется, что коренным образом изменяет механизм аэродинамического нагрева конструкции. Определяющую роль в таком пограничном слое начинают выполнять процессы тепло - и массообмена. При этом возникает необходимость совместного учёта диссипативных процессов, обусловленных вязкостью, а так же физико-химических процессов, реализуемых в газовой фазе и на поверхности ВЛА (гетерогенный катализ). В связи с указанным, проблема теплообмена в химически активном пограничном слое становится многопараметрической, а это существенно усложняет математическую модель химически активного пограничного слоя, что, в свою очередь, требует применения численных методов её решения. Влияние катализаторов на химические реакции известно давно. Однако детальное понимание механизма этого процесса, управление его интенсивностью в переносе теплоты и массы в объёме химически активного пограничного слоя всё ещё недостаточно исследовано.

Задача изучения гетерогенного катализа остается актуальной особенно применительно к разработке высокоскоростных летательных аппаратов нового поколения. Результаты таких исследований позволят создать принципиально новые варианты тепловой защиты, в том числе системы многофункционального назначения, что в свою очередь, даёт возможность реализовать проекты гражданских ВЛА.

### **Степень разработанности темы.**

Дальнейшее развитие теории и практики исследования процессов тепло- и массообмена на каталитически активной поверхности поскольку в настоящее

время подобного рода задачи не имеют законченного решения и требуют их совершенствования.

**Цель диссертационной работы** – экспериментальное и теоретическое исследование процессов тепло- и массообмена на каталитически активной поверхности высокоскоростного летательного аппарата планирующего класса.

**Задачи исследования:**

Для достижения указанной цели в работе решены следующие задачи:

-с позиции современной химтермодинамики проведён анализ гетерогенного катализа и его вклада в процесс тепло - и массообмена в химически активном пограничном слое. Определены физико-химические основы гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности;

-составлена общая математическая модель термогазодинамики и тепло - и массообмена химически активного пограничного слоя на каталитически активной поверхности;

-проведён анализ возможностей эмпирического моделирования характеристик гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности. Предложены общие положения моделирования, на базе которых разработаны и апробированы методы и средства исследования гетерогенного катализа;

-сформулированы основные положения по улучшению каталитических свойств композиционных материалов теплозащитного назначения. Разработаны и апробированы методы и средства улучшения каталитических свойств;

- составлен алгоритм определения каталитических свойств материалов по результатам эксперимента. Проведено улучшение каталитических свойств углерод-углеродных и металлокерамических композиционных материалов. Сравнение экспериментальных и расчётных данных тепломассообмена показало удовлетворительное соответствие.

**Научная новизна работы:**

1. В экспериментально-теоретическом исследовании физико-химических процессов гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности;
2. В составлении общей математической модели термогазодинамики и тепло - и массообмена химически активного пограничного слоя на каталитически активной поверхности и численном методе её решения;
3. В модификации широко используемого уравнения Р. Гуларда при расчёте тепло - и массообмена на каталитически активной поверхности и обоснованности достоверности полученного модифицированного уравнения;
4. В разработке и апробации методов и средств улучшения каталитических свойств термостойких композиционных материалов теплозащитного назначения;

5. В предложении и апробации метода и средств улучшения каталитических свойств углерод-углеродных теплозащитных материалов путём формирования на их поверхности тонких композиционных металлокерамических покрытий.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая ценность работы заключается в создании математической модели, позволяющей с высокой точностью рассчитывать с учётом гетерогенного катализа процессы теплообмена на поверхности элементов конструкции ВЛА.

Практическая значимость работы состоит в разработке метода и средств улучшения каталитических свойств материалов тепловой защиты ВЛА разного функционального назначения.

**Методология исследования** основана на проведении математического и экспериментального моделирования и изучения вклада гетерогенного катализа в процессы теплообмена на каталитически активной поверхности ВЛА.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Общая математическая модель процессов гетерогенного катализа и теплообмена на поверхности высокоскоростных летательных аппаратов.
2. Сравнительный анализ полученных результатов математического и экспериментального моделирования теплообмена на каталитически активной поверхности тепловой защиты ВЛА.
3. Методы и средства улучшения термостойкости и каталитических свойств углерод-углеродных композиционных материалов.

**Степень достоверности результатов** работы подтверждается использованием математических моделей, основанных на фундаментальных законах механики и теплофизики, удовлетворительным совпадением результатов численного решения, предложенной матмодели, с данными стендовых экспериментов и тестовых расчётов данными других авторов, полученными при прочих равных начальных условиях.

#### **Личный вклад автора** выражается:

- в составлении общей математической модели и алгоритма её численного решения,
- в сопоставлении и анализ теоретических и экспериментальных данных,
- в разработке и апробации метода и средств улучшения каталитических свойств термостойких композиционных материалов,
- в разработке алгоритма экспериментального определения этих свойств,
- в расчёте тепло- и массообмена на каталитически активной поверхности сверхзвуковых ЛА.

### **Апробация работы.**

Основные положения диссертации и результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: «Гагаринские чтения-2016», «Авиация и космонавтика-2016», «Авиация и космонавтика-2019», «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией-2016», «XXI школа – семинар молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтива-2017», «Всероссийская конференция молодых учёных-механиков -2017», «Всероссийская конференция молодых учёных-механиков - 2018», «Фундаментальная наука и технологии – перспективные технологии-2018», «Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике-2019», «Туполевские чтения-2019», «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации-2019», "Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers 2020".

### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 19 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ.

### **Структура и объем диссертации.**

В представленной работе рассмотрены физико-химические основы и методы исследования гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности; отмечены факторы, влияющие на его интенсивность; проведён анализ возможностей эмпирического моделирования характеристик гетерогенного катализа; составлена общая математическая модель термогазодинамики и тепло - и массообмена химически активного пограничного слоя; составлен алгоритм определения каталитических свойств материалов по результатам эксперимента; проведен анализ по улучшению каталитических свойств композиционных материалов теплозащитного назначения.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа представлена на 145 страницах основного текста, включающего 30 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 95 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы. Показана новизна работы, её научная и практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов. Кратко охарактеризованы методы исследования, используемые в работе.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние и суть проблемы.

При полёте высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) в плотных слоях атмосферы у его поверхности реализуется переход кинетической энергии в тепловую, что в свою очередь определяет аэродинамический нагрев

конструкции. Интенсивность этого процесса зависит от массы, высоты и скорости полёта. Поступающий в конструкцию летательного аппарата (ЛА) тепловой поток увеличивает тепловое состояние элементов конструкции аппарата, что снижает его надежность. Для снижения интенсивности этого процесса на поверхности ВЛА создаётся специальная тепловая защита (ТЗ), в конструкции которой используются разного рода теплозащитные материалы (ТЗМ). В зависимости от стратегического назначения ВЛА тепловая защита может быть многократного или одноразового применения. При этом она должна обеспечить надёжность аппарата в течение всего времени выполнения лётной программы.

Тепловой поток, поступающий в конструкцию, формируется в совокупности тремя процессами теплообмена, реализуемых в химически активном пограничном слое: теплопроводностью, конвекцией и диффузией.

Диффузионная составляющая определяется процессом диффузии атомов к поверхности с последующей реализацией гетерогенной экзотермической реакции рекомбинации атомов. Поскольку это реакция химическая, то ей можно управлять, используя материалы, обладающие свойствами катализаторов или ингибиторов.

Состав газа у поверхности ВЛА устанавливается скоростью протекания химических взаимодействий в объёме, сжатого и пограничного слоёв, которая, в свою очередь, зависит от температуры. Для высокотемпературного воздуха такими процессами являются реакции диссоциации молекул и рекомбинации атомов кислорода ( $O_2$ ) и азота ( $N_2$ ). Например, при температуре торможения  $T_0=5000K$  и давлении торможения  $P_0=10^4\div 10^5Pa$  двухкомпонентный воздух преобразуется в многокомпонентный. Его состав образуют:  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O$ ,  $N$  и  $NO$ . В случае входа КЛА в плотные слои атмосферы со скоростью равной или близкой ко второй космической, компонентный состав пограничного слоя включает 11 компонентов:  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O$ ,  $N$ ,  $NO$ ,  $NO^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $e$ .

Схему реакций, протекающих на поверхности ВЛА, можно представить в виде:  $A + \text{поверхность} \leftrightarrow B + \text{поверхность}$ . Механизм реакций изображён на рисунке 1.

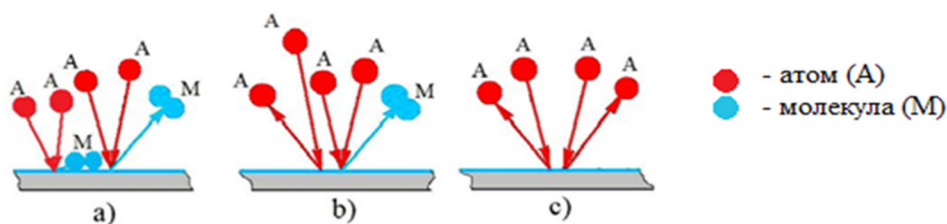


Рис. 1. Схема механизма реализации гетерогенной реакции рекомбинации атомов на поверхности ТЗ

Опираясь на знания процесса диффузии, можно выделить следующие варианты взаимодействия химически активных атомов с поверхностью:

- Атомы, достигнув поверхности, реагируют с материалом конструкции. В итоге, происходит унос или прирост массы;
- Протекает гетерогенная реакция рекомбинации атомов с выделением теплоты – теплота образования молекул (поверхность каталитически активная);
- Гетерогенная реакция рекомбинации атомов отсутствует (поверхность обладает свойством ингибитора).

Как известно, химическое состояние пограничного слоя на каталитически активной поверхности ТЗ определяются высотой и скоростью полёта ВЛА в плотных слоях атмосферы. При этом реализуются три возможных состояния пограничного слоя:

- «Замороженный» пограничный слой;
- Равновесный пограничный слой;
- Неравновесный пограничный слой.

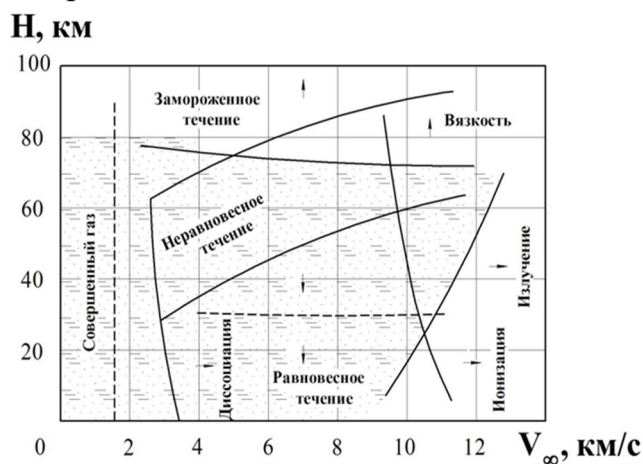


Рисунок 2 - Возможные химические состояния течения в пограничном слое в зависимости

от высоты и скорости полёта космического аппарата.

Расчёт проведён для сферы с радиусом,  $R=1\text{м}$ . Область влияния вязкости и излучения на режимы течения заштрихована

**Вовторой главе** проведён анализ физико-химических факторов, влияющих на интенсивность тепло- и массообмена в химически активном пограничном слое на каталитически активной поверхности:

- Микроструктура материала тепловой защиты;
- Геометрические размеры элементов конструкции;
- Условия эксплуатации: высота, скорость полёта и температура поверхности конструкции.



**В третьей главе** представлена общая математическая модель, описывающая процессы тепло- и массообмена на каталитически активной поверхности:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность газовой смеси [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ];  $u_j$  - компонента скорости в  $j$ -ом направлении [ $\text{м}/\text{с}$ ]

- уравнение количества движения:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i + \delta_{ji} p - \tau_{ij}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где  $p$  - давление;  $\tau_{ij}$  - тензор вязких напряжений

- уравнение сохранения массы химического компонента  $s$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_s) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_s + J_{s,j}) = \dot{w}_s, \quad s = 1, 2, \dots, N_C - 1, \quad (3)$$

$$\text{где массовая доля компонента } s \quad C_s = \frac{\rho_s}{\rho_{см}}, \quad (4)$$

$\rho_s$  - плотность компонента  $s$ ;  $\rho_{см} \dot{w}_s$  - скорость образования компонента  $s$  в результате химических реакций;  $N_C$  - количество компонентов газовой смеси;  $J_{s,j} \equiv \rho_s V_{s,j}$  - диффузионный поток;  $V_{s,j}$  - диффузионная скорость компонента  $s$  в  $j$ -ом направлении.

- уравнение полной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_j (\rho E + p) + q_j - u_i \tau_{ij}] = -Q_R, \quad (5)$$

где  $E$  - полная энергия;  $q_j$  - плотность теплового потока, обусловленного теплопроводностью и диффузией, в  $j$ -ом направлении;  $Q_R$  - плотность теплового потока, излучаемого с поверхности.

- уравнения сохранения колебательных энергий:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E_{v,m}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j E_{v,m} + q_{v,m,j}) = \rho \dot{E}_{v,m}, \quad m = 1, 2, \dots, N_M, \quad (6)$$

где  $E_{v,m}$  - колебательная энергия  $m$ -ой колебательной моды, содержащая в единице массы газовой смеси;  $\rho \dot{E}_{v,m}$  - источник колебательной энергии, обусловленный всеми процессами энергообмена;  $q_{v,m,j}$  - плотность колебательного теплового потока;  $N_M$  - число колебательных мод.

Составленная в данной главе общая математическая модель, учитывающая положения химической кинетики, позволяет рассчитать для ламинарного и турбулентного режимов течения тепловой поток в любой точке каталитически активной поверхности высокоскоростного летательного аппарата.

***Некоторые результаты верификации математической модели в сравнении с результатами численного моделирования теплообмена на каталитически активной поверхности конической притупленной сферой головной части ВЛА.***

Расчёт проведен численным методом с соответствующими граничными условиями. С целью сокращения ресурса времени, расчет теплообмена проводился только в отдельных точках на поверхности головной части ВЛА конической формы, притупленной сферой. Радиус притупления  $R_0$  составлял 0,1м. Каталитическая активность материала поверхности менялась в широком диапазоне:  $0,01 \leq k_w \leq 100 \text{ м/с}$ . [Ранее, при анализе процесса рекомбинации атомов на каталитически активной поверхности введено понятие коэффициента каталитической активности  $k_w$ ]. Для более глубокого анализа влияния на теплообмен каталитической активности поверхности высоты полёта ВЛА выбраны равными 60км и 75км. Как отмечалось в предыдущих главах, при полёте ВЛА на указанных высотах на поверхности аппарата реализуется химически неравновесный пограничный слой.

Исходные параметры для расчёта тепломассообмена в таком пограничном слое, реализованным на поверхности головной части ВЛА заданных размеров и разными значениями коэффициента каталитической активности  $k_w$ , представлены в таблице 1.

Таблица 1- Параметры для расчёта теплообмена на поверхности головной части (ГЧ) ВЛА. Высоты полёта 60км и 75 км

|   |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Скорость полета,<br>км/с                              | 7,8  | 6,6  | 6,0  | 4,8  | 3,6  | 3,0  | 2,4  |
| Коэф.<br>каталитической<br>активности, $k_{w1}$ , м/с | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| $k_{w2}$ , м/с  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  |

|                |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                |     |     |     |     |     |     |     |
| $k_{w3}$ , м/с | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| $k_{w4}$ , м/с | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  |
| $k_{w5}$ , м/с | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Таблица 2-Результаты расчёта плотности теплового потока  $q_{wв}$  передней критической точке (ПКТ) ГЧ ВЛА при полёте на высоте 60км с разными скоростями и разными значениями коэффициента каталитической активности поверхности  $k_w$

| Скорость полета,<br>$V_{\infty}$ .<br>Критерий М.  | 7,8 км/с<br>М=27,4 | 6,6 км/с<br>М=23,1<br>6 | 6,0 км/с<br>М=21,0 | 4,8 км/с<br>М=16,8<br>4 | 3,6 км/с<br>М=12,<br>6 | 3,0 км/с<br>М=10,5 | 2,4 км/с<br>М=8,42 |
|--|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| Значения $q_w$ [Вт/м <sup>2</sup> ] для разных значений скорости полёта и коэффициентов каталитической активности $k_w$ .<br>$k_{w1}=0,01$ м/с | $6.5 \cdot 10^6$   | $4.2 \cdot 10^6$        | $3.3 \cdot 10^6$   | $1.9 \cdot 10^6$        | $9.0 \cdot 10^5$       | $4.8 \cdot 10^5$   | $2.05 \cdot 10^5$  |
| $k_{w2} = 0,1$ м/с   | $9.2 \cdot 10^6$   | $6.0 \cdot 10^6$        | $4 \cdot 10^6$     | $2.12 \cdot 10^6$       | $9.1 \cdot 10^5$       | $4.8 \cdot 10^5$   | $2.05 \cdot 10^5$  |
| $k_{w3} = 1,0$ м/с   | $1.52 \cdot 10^7$  | $9.1 \cdot 10^6$        | $5.7 \cdot 10^6$   | $2.62 \cdot 10^6$       | $9.3 \cdot 10^5$       | $4.8 \cdot 10^5$   | $2.05 \cdot 10^5$  |
| $k_{w4} = 10$ м/с  | $1.89 \cdot 10^7$  | $1.0 \cdot 10^7$        | $6.6 \cdot 10^6$   | $2.76 \cdot 10^6$       | $9.6 \cdot 10^5$       | $4.81 \cdot 10^5$  | $2.05 \cdot 10^5$  |

|                          |                  |                   |                  |                   |                  |                   |                   |
|--------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| $k_{w5} = 100\text{м/с}$ | $2.0 \cdot 10^7$ | $1.01 \cdot 10^7$ | $6.8 \cdot 10^6$ | $2.86 \cdot 10^6$ | $9.7 \cdot 10^5$ | $4.81 \cdot 10^5$ | $2.05 \cdot 10^5$ |
|--------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|

Таблица 3 - Результаты расчёта плотности теплового потока  $q_w$  в передней критической точке (ПКТ) ГЧ ВЛА при полёте на высоте 75км с разными скоростями и разными значениями коэффициента каталитической активности поверхности  $k_w$

| Скорость полета,<br>$V_\infty$ .<br>Критерий М.  | 7,8 км/с<br>М=27,4 | 6,6 км/с<br>М=23,16 | 6,0 км/с<br>М=21,0 | 4,8 км/с<br>М=16,84 | 3,6 км/с<br>М=12,6 | 3,0 км/с<br>М=10,5 | 2,4 км/с<br>М=8,42 |
|--|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Значения $q_w$ [Вт/м <sup>2</sup> ] для разных значений скорости полёта и коэффициентов в каталитической активности $k_w$ .<br>$k_{w1}=0,01$ м/с | $4.2 \cdot 10^6$   | $2.4 \cdot 10^6$    | $1.8 \cdot 10^6$   | $9.0 \cdot 10^5$    | $3.26 \cdot 10^5$  | $1.63 \cdot 10^5$  | $7.1 \cdot 10^4$   |
| $k_{w2} = 0,1\text{м/с}$   | $4.34 \cdot 10^6$  | $2.46 \cdot 10^6$   | $1.81 \cdot 10^6$  | $9.0 \cdot 10^5$    | $3.26 \cdot 10^5$  | $1.63 \cdot 10^5$  | $7.1 \cdot 10^4$   |
| $k_{w3} = 1,0$ м/с   | $5.0 \cdot 10^6$   | $2.756 \cdot 10^6$  | $1.97 \cdot 10^6$  | $9.3 \cdot 10^5$    | $3.25 \cdot 10^5$  | $1.63 \cdot 10^5$  | $7.1 \cdot 10^4$   |
| $k_{w4} = 10\text{м/с}$  | $5.75 \cdot 10^6$  | $3.07 \cdot 10^6$   | $2.14 \cdot 10^6$  | $9.5 \cdot 10^5$    | $3.24 \cdot 10^5$  | $1.63 \cdot 10^5$  | $7.1 \cdot 10^4$   |
| $k_{w5} = 100\text{м/с}$   | $6.12 \cdot 10^6$  | $3.2 \cdot 10^6$    | $2.2 \cdot 10^6$   | $9.58 \cdot 10^6$   | $3.26 \cdot 10^5$  | $1.63 \cdot 10^5$  | $7.1 \cdot 10^4$   |

На рис.3, 4 и 5, для большей наглядности, построены графические зависимости с использованием данных, приведенный в таблицах. Анализ показал, что плотность теплового потока в ПКТ головной части ВЛА сильно зависит не только от высоты и скорости полёта, но и каталитической активности поверхности материала  $k_w$ .

Например, при полёте на высоте 60км со скоростью 6000м/с изменение уровня каталитической активности материала от  $k_w = 0,01\text{м/с}$  до  $k_w=100\text{м/с}$

увеличивает плотность теплового потока на ~55%. При полёте же аппарата на высоте 75км с такой же скоростью влияние уровня каталитической активности материала на теплообмен заметно снижается. Например, в указанном выше диапазоне изменения  $k_w$  плотность теплового потока в ПКТ возраст всего лишь на ~20%.

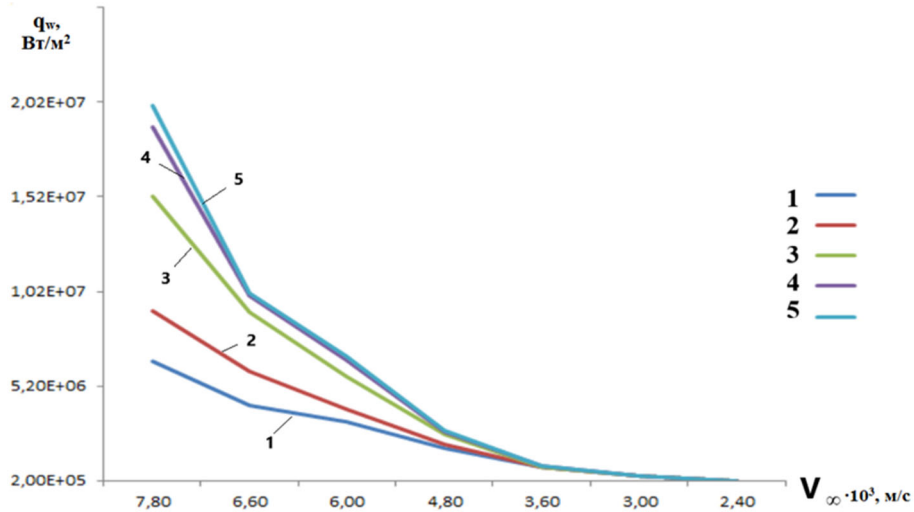


Рисунок 5 - Влияние скорости полёта  $V_\infty$  ВЛА (высота 60км) на изменение плотности теплового потока  $q_w$  в ПКТ ГЧ ВЛА конической формы, притупленной сферой радиуса  $R_0$ , при разных уровнях каталитической активности поверхности  $k_w$ : 1-0,01м/с; 2-0,1м/с; 3-1м/с; 4-10м/с; 5-100м/с

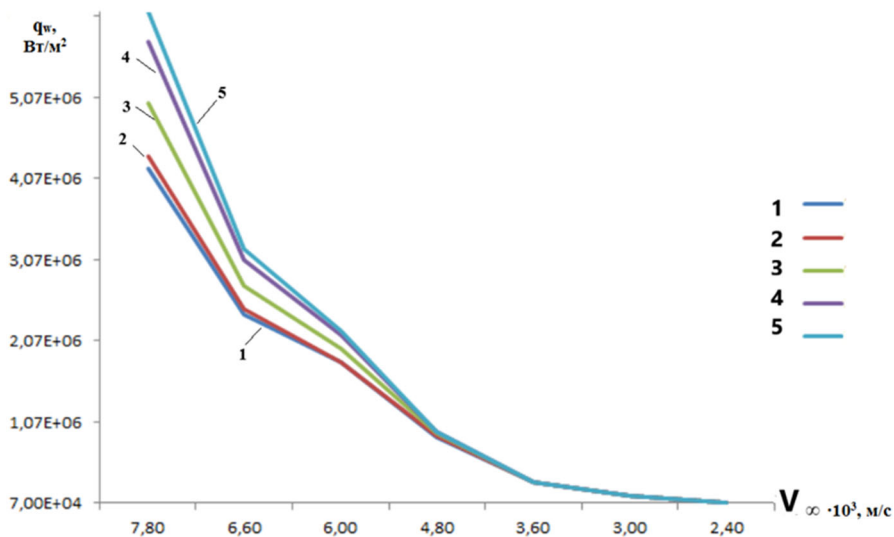


Рис. 4. Влияние скорости полёта  $V_\infty$  ВЛА (высота 75км) на изменение плотности теплового потока  $q_w$  в ПКТ ГЧ ВЛА конической формы, притупленной сферой радиуса  $R_0$ , при разных уровнях каталитической активности поверхности  $k_w$ : 1-0,01м/с; 2-0,1м/с; 3-1м/с; 4-10м/с; 5-100м/с

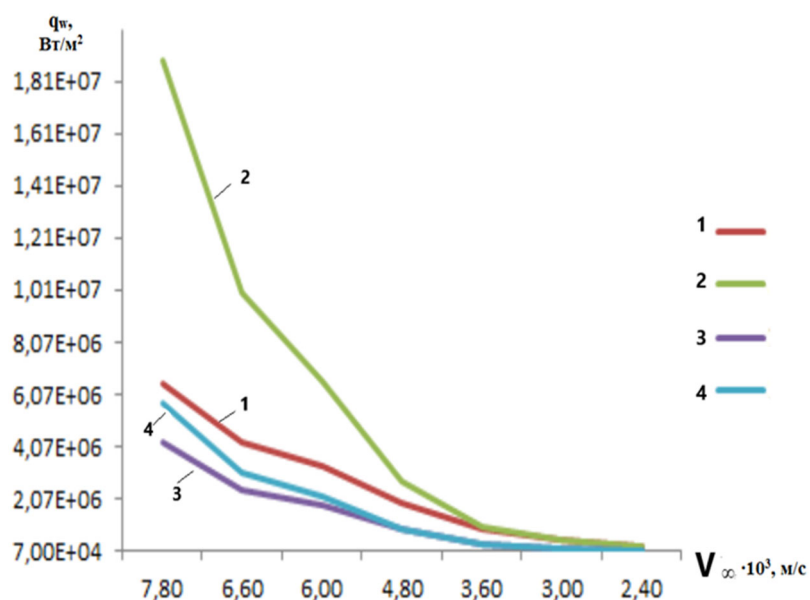


Рисунок 5 -Влияние скорости полёта  $V_{\infty}$  и высоты полёта ВЛА на изменение плотности теплового потока  $q_w$  в ПКТ ГЧ ВЛА конической формы при абсолютной каталитической поверхности ( $k_w=10,0 \text{ м/с}$ ), и при ингибиторной поверхности ( $k_w=0,01 \text{ м/с}$ ). 1-  $k_w=0,01 \text{ м/с}$  2-  $k_w=10 \text{ м/с}$  – высота  $H=60 \text{ км}$ ; 3 -  $k_w=0,01 \text{ м/с}$ ; 4 -  $k_w=10 \text{ м/с}$  – высота  $H=75 \text{ км}$

Анализ расчётных данных показал так же, что изменение каталитической активности материала поверхности  $k_w$  ГЧ ВЛА и скорости его полёта  $V_{\infty}$  на высотах  $H=60 \text{ км}$  и  $75 \text{ км}$  влияют по-разному на величину  $q_w$  в ПКТ.

Например, при полёте аппарата со скоростями  $V_{\infty}=2400 \text{ м/с}$  на высоте  $60 \text{ км}$  и изменение  $k_w$  от  $0,01 \text{ м/с}$  до  $k_w=100 \text{ м/с}$  не изменяет плотность теплового потока в ПКТ. Аналогичная картина наблюдается и при полёте аппарата при тех же условиях, но со скоростью  $V_{\infty}=3000 \text{ м/с}$ .

При полёте аппарата на высоте  $75 \text{ км}$  картина несколько меняется. Например, увеличение  $k_w$  от  $0,01 \text{ м/с}$  до  $k_w=100 \text{ м/с}$  не изменяет плотность теплового потока в ПКТ при скоростях полёта  $V_{\infty}=2400 \text{ м/с}$ ,  $V_{\infty}=3000 \text{ м/с}$  и  $V_{\infty}=3600 \text{ м/с}$ .

Ниже, на рис. 6 и 7 приведены некоторые данные численного расчёта предложенной математической модели распределения плотностей тепловых потоков  $q_w$  на поверхности головной части ВЛА при полёте на высоте  $60 \text{ км}$  и  $75 \text{ км}$  при разных значениях коэффициента каталитической активности  $k_w$  и

постоянной скорости полёта  $V_\infty=6000\text{м/с}$ . Видно, что вниз по набегающему потоку плотность теплового потока  $q_w$  уменьшается. Кроме того, из приведенных данных следует, что значительное увеличение коэффициента каталитической активности  $k_w$  поверхности ГЧ оказывает не значительное влияние на величину  $q_w$  уже при значении безразмерной координаты  $X=x/R_0 \geq 1,5$ .

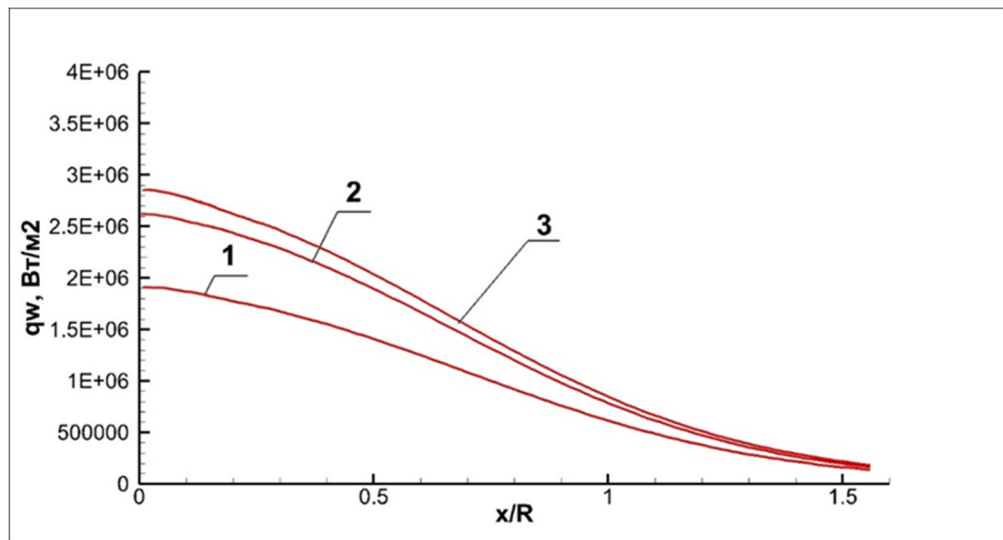


Рисунок 6 - Изменение плотности теплового потока  $q_w$  по поверхности ВЛА конической формы, притупленной сферой радиуса  $R_0$ , при  $V_\infty = \text{const}$  и разных значениях коэффициента каталитической активности  $k_w$  ТЗМ.

$H = 60\text{км}$ , скорость полёта  $V_\infty = 6000\text{м/с}$   
 1 -  $k_w = 0,01\text{м/с}$ , 2 -  $k_w = 1\text{м/с}$ , 3 -  $k_w = 100\text{м/с}$

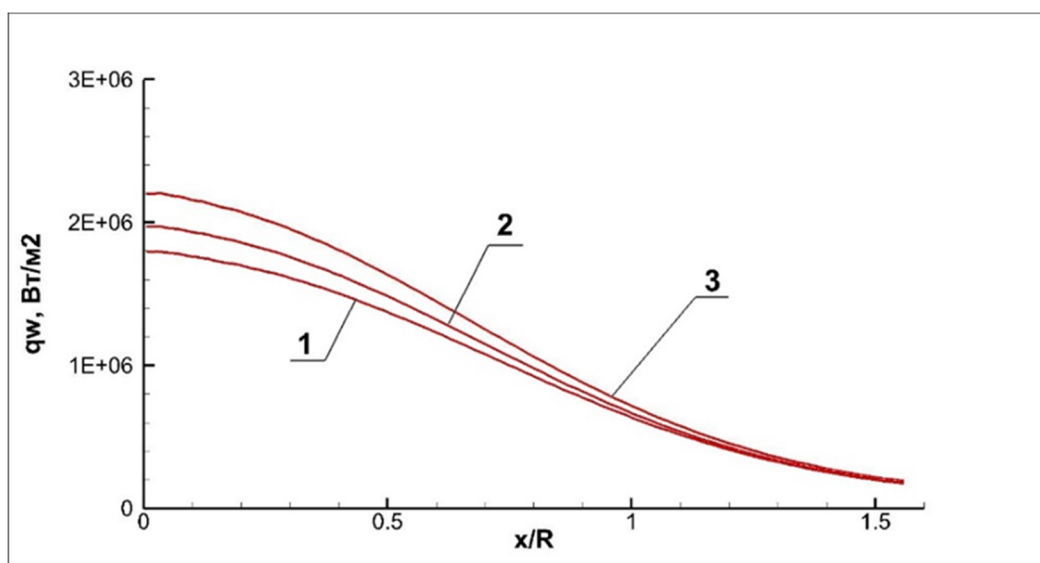


Рисунок 7 - Изменение плотности теплового потока  $q_w$  по поверхности ВЛА конической формы, притупленной сферой радиуса  $R_0$ , при  $V_\infty = \text{const}$  и разных значениях коэффициента каталитической активности  $k_w$  ТЗМ.

$$H=75\text{км}, V_\infty=6000\text{м/с}$$

$$1 - k_w=0,1\text{м/с}, 2 - k_w=1,0\text{м/с}, 3 - k_w=100\text{м/с}$$

Следует отметить, что согласно данным расчёта, на высоте 75км с уменьшением скорости полёта  $V_\infty$  влияние каталитической активности поверхности  $k_w$  на распределение плотности теплового  $q_w$  заметно отличается от аналогичного распределения  $q_w$  на высоте полёта 60км. Это отличие на высоте 75км проявляется при значении безразмерной координаты  $X=x/R_0 \leq 1,5$ , в то время как, на высоте 60 км  $X \geq 1,5$ .

Анализ приведённых на указанных рисунках расчётных данных позволил выявить ещё одну важную особенность в механизме тепломассообмена, которая реализуется в химически активном пограничном слое на каталитически активной поверхности ВЛА при полёте на больших высотах. Суть этой особенности заключается в следующем. При  $k_w=0,01\text{м/с}$  (т.е.  $k_w \approx 0$ ) поверхность аппарата проявляет свойства ингибитора для реакций гетерогенной рекомбинации атомов кислорода и азота. В этом случае градиент указанных атомов в объёме пограничного слоя самоликвидируется, что устраняет процесс их диффузии к стенке. Тогда  $q_D \rightarrow 0$  и плотность теплового потока  $q_w$  в стену аппарата обеспечивается только поступательной теплопроводностью, т.е.  $q_w = q_\lambda$ .

**Четвертая глава** посвящена критическому анализу и модификации алгебраического критериального соотношения американского ученого Р. Гулларда. Полученное Р. Гуллардом соотношение в настоящее время широко используется в инженерной практике.

Соотношение, рекомендованные Р. Гуллардом для расчёта теплообмена как в передней критической точке, так в любой точке на боковой поверхности КЛА, требуют уточнения в связи с принятыми при их выводе некорректными допущениями, не подтвердившиеся в реальных условиях полёта ВЛА. Некорректность принятого допущения обоснована в указанной главе диссертации.

В результате проведенной модификации в главе 4 получены соотношения для расчёта значений плотностей теплового потока в ПКТ (7) и на боковой поверхности при реализации ламинарного (8) режима течения.



$$q_0 = 0,664 [\beta \cdot (\mu_0 \cdot \rho_0)]^{1/2} \cdot \text{Pr}_w^{-2/3} \cdot \left(\frac{I_w}{I_0}\right)^{-0,17} \left[ 1 + \left(Le^{2/3} \varphi - 1\right) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n h_i^0 \cdot C_{i,\infty}}{I_0} \right] (I_0 - I_w) \quad (7)$$

$$q_0 = 0,664 \cdot \text{Re}_w^{1/2} \cdot \text{Pr}_w^{-2/3} \cdot \frac{\mu_w}{x_{эф.}} \cdot \left(\frac{I_w}{I_0}\right)^{-0,17} \cdot \left[ 1 + \left(Le^{2/3} \cdot \varphi - 1\right) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n h_i^0 \cdot C_{i,\infty}}{I_0} \right] \cdot (I_e - I_w) \quad (8)$$

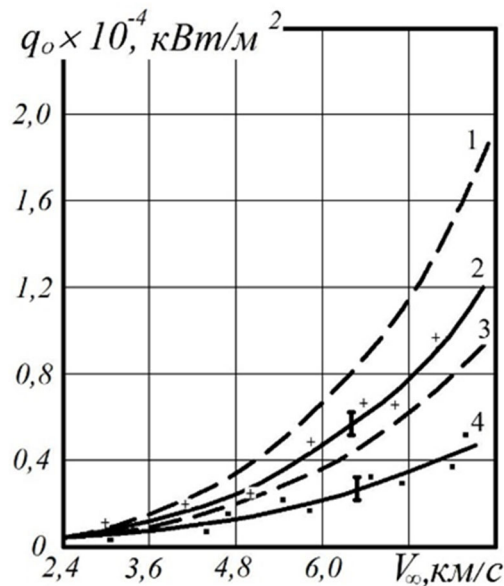


Рисунок 8 - Плотность теплового потока в передней критической точке КЛА сферической формы  $R_0 = 0,1\text{ м}$  на высоте полета  $60\text{ км}$  в зависимости от скорости полета и разных значений каталитической активности поверхности. Температура поверхности  $T_w = 1000\text{ К}$ .

1 -  $k_w = 1\text{ м/с}$  - расчет по Гулларду; 2 -  $k_w = 1,0\text{ м/с}$  – модифицированное уравнение; 3 -  $k_w = 0,1\text{ м/с}$ , расчет по Гулларду; 4 -  $k_w = 0,1\text{ м/с}$  модифицированное уравнение,

+ - эксперимент МАИ,  $k_w \approx 1,0\text{ м/с}$ ,

■ - эксперимент МАИ,  $k_w \approx 0,1\text{ м/с}$

Таким образом, из анализа результатов, полученных в данном разделе, следует, что выбор материалов тепловой защиты ВЛА планирующего класса должен проводиться с научным обоснованием применимости каждого конкретного материала с позиции как его теплозащитных, так и каталитических свойств.

**В пятой главе** проанализирована задача прогноза разработок надёжной тепловой защиты высокоскоростных летательных аппаратов на основе

углеродных композиционных материалов (УУКМ). Показано, что улучшение термостойкости и каталитических свойств УУКМ возможно путем формирования на поверхностях элементов конструкции тонких термостойких композиционных покрытий с необходимыми уровнями каталитической активности. Приведены методы и средства определения каталитических свойств термостойких систем на газодинамических стендах с ВЧ-плазмотронами.

Представленные установки позволяют решать ряд задач:

- Экспериментальное исследование термостойкости материалов теплозащитного назначения и покрытий с разными каталитическими свойствами при воздействии тепловых потоков, по уровню соответствующих траекторным;

- Определение константы скоростей гетерогенной рекомбинации атомов кислорода и азота при обтекании поверхности материалов тепловой защиты потоком высокотемпературного воздуха в широком диапазоне температур торможения;

- Испытывать материалы на термохимическую стойкость при воздействии диссоциированным набегающим потоком;

- Проводить ресурсные испытания ТЗМ.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рамках представленного в данной работе исследования процессов тепло-массообмена на каталитически активной поверхности высокоскоростного летательного аппарата планирующего класса решены следующие задачи:

1. С учетом аспектов химтермодинамики проведён анализ гетерогенного катализа и его вклада в процесс тепло - и массообмена в химически активном пограничном слое. Определены физико-химические основы гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности;

2. Составлена общая математическая модель термогазодинамики и тепло - и массообмена химически активного пограничного слоя на каталитически активной поверхности;

3. проведён критический анализ допущений американского исследователя Р. Гулларда, сделанных при выводе соотношения для расчёта тепло - и массообмена на каталитически активной поверхности. Показана их несостоятельность. На базе проведенного анализа в данной работе получено

модифицированное соотношение Р. Гулларда, достоверность которого подтверждено экспериментально;

4. Проведён анализ возможностей эмпирического моделирования характеристик гетерогенного катализа на каталитически активной поверхности. Предложены общие положения моделирования, на базе которых разработаны и апробированы методы и средства исследования гетерогенного катализа;

5. Сформулированы основные положения по улучшению каталитических свойств углерод-углеродных и металлокерамических композиционных материалов. Разработаны и апробированы методы и средства определения и улучшения каталитических свойств;

6. Проведена верификация разработанной математической модели путём сопоставления экспериментальных и расчётных данных теплообмена на каталитически активной поверхности. Удовлетворительное соответствие данных указывает на достоверность предложенной математической модели.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях**

1. Shkuratenko (Zubko) A. A. On experimental determination of the catalycity coefficient of heat-proof thermal protection materials //Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1565, No. 1. Art. 012084. P.1-6. URL:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1565/1/012084/pdf>

2. Nikitin P.V., Tushavina O.V., Shkuratenko (Zubko) A.A.. Calculation of heat transfer on the catalytically active surface of high-speed aircraft // INCAS BULLETIN. 2019. V. 11, Special Issue. P.191-201.

3. Nikitin P.V., Rabinskiy L.N., Shkuratenko (Zubko) A.A., Tushavina O.V. Condition and forecast of composite carbon development and cermet heat-shielding materials with improved catalytic and radiative properties // Asia Life Sciences. 2019. No. 1. P. 591–599.

4. Шкуратенко (Зубко) А.А. Тепло- и массообмен на каталитически активной поверхности головной части космического аппарата планирующего класса // Тепловые процессы в технике. 2016. Т.8, № 8. С. 345-352.

5. Никитин П.В., Шкуратенко (Зубко) А.А. Влияние каталитически активной поверхности на интенсивность конвективного теплообмена // Труды

МАИ. 2016. № 88. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70401> (дата обращения 30.09.2020)

### **Другие публикации**

6. Шкуратенко (Зубко) А.А. Теплообмен на каталитически активной поверхности элементов конструкции гиперзвуковых летательных аппаратов // Сборник тезисов XLII Международной молодежной научной конференций «Гагаринские чтения» (Москва, апрель 2016). – М.: Изд-во МАИ, 2016, - Т.3.- С. 363-364 (752с.).

7. Шкуратенко (Зубко) А.А. Улучшение свойств тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов путем снижения каталитической активности поверхности // Сборник тезисов 15-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, ноябрь 2016). – М.: Типография "Люксор", 2016, - С.247-249 (739с.).

Режим доступа: <http://files.mai.ru/site/conf/aik/2016/abstracts.pdf> (дата обращения 09.09.2020).

8. Шкуратенко (Зубко) А.А. Теплообмен на каталитически активной поверхности элементов гиперзвуковых летательных аппаратов // Сборник тезисов Международного молодежного форума «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией»(Москва,апрель 2016). – Рыбинск.: Изд-во РГАТУ имени П.А. Соловьёва, 2016, - С. 123-127 (130с.).

9. Шкуратенко (Зубко) А.А. Гетерогенный катализ в химически активном пограничном слое // Сборник тезисов XLIII Международной молодежной научной конференций «Гагаринские чтения» (Москва, апрель 2017). – М.: Изд-во МАИ, 2019,- Т.3. - С. 189-190.

10. Шкуратенко (Зубко) А.А. Влияние гетерогенно катализа на теплообмен в химически активном пограничном слое // Сборник тезисов XXI школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург, май 2017). – М.: Изд-во Издательский дом МЭИ, 2017, – Т.2. -С. 281-282 (308с.).

11. Шкурятенко (Зубко) А.А. Особенности термогазодинамики и теплообмена при обтекании притупленного тела гиперзвуковым потоком // Сборник тезисов Всероссийской конференция молодых ученых – механиков (Сочи, сентябрь 2017). – М: Изд-во Московского университета, 2017, - С. 121 (122с.).
12. Шкурятенко (Зубко) А.А. Определение каталитических и излучательных свойств теплозащитных материалов на высокотемпературных газодинамических стендах // Сборник тезисов XII Всероссийской конференции молодых ученых(Новосибирск, Март 2018). – Новосибирск: Изд-во Параллель, 2018, - С.167-168 (183с.).
13. Шкурятенко (Зубко) А.А. Диагностика теплообмена в гиперзвуковых потоках с целью определения каталитических и излучательных свойств // Сборник тезисов Всероссийской конференция молодых ученых-механиков(Сочи, сентябрь 2018). – М.: Изд-во Московского университета, 2018, -С. 166 (172с.).
14. Шкурятенко (Зубко) А.А. Влияние каталитической активности поверхности на тепло- и массообмен в химически активном пограничном слое // Сборник тезисов Международной научно-практической конференции «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки» (Северный Чарльстон, Ноябрь 2018). - Cary, NS: Изд-во LuluPress, 2018, - Т. 1 - С. 93-96 (147с.).
15. Никитин П.В., Шкурятенко (Зубко) А.А. Алгоритм экспериментального определения коэффициента каталитической активности для расчёта плотности теплового потока // Сборник тезисов Семинара ВУЗов по теплофизике и энергетике. (Санкт-Петербург, Октябрь 2019). – С.-Пб.: Изд-во ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019, - С.288-289 (447с.).
16. Никитин П.В., Шкурятенко (Зубко) А.А. Формирование разнофункциональных покрытий сверхзвуковым низкотемпературным газодинамическим потоком // Сборник тезисов 18-ой Международной

конференции «Авиация и космонавтика» (Москва. Ноябрь 2019). – М.: Типография «Логотип», 2019, - С.543 (605с.).

17. Шкуратенко А.А. Состояние и прогноз разработок композиционных материалов на основе углеродистых и керамических композиций // Сборник тезисов XXIV Туполевских чтений (школа молодых учёных): международная молодежная научная конференция, (Казань, 7-8 ноября 2019). – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2019, -Т. 1, - С.527-533 (668с.).

18. Никитин П.В., Побережский С.Ю., Шкуратенко А.А. Определение коэффициентов теплопереноса в органических жидкостях и их растворах // Сборник тезисов XX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2019». (Пермь, Ноябрь 2019). – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2019, - Ч. 1. - С.103-106 (221с.).

19. Мякочин А.С., Никитин П.В., Побережский С.Ю., Шкуратенко А.А. Метод и средства определения коэффициентов теплопереноса в органически жидкостях и растворах // Космическая техника и технологии. 2020. №3. С. 5-14.