

## ОТЗЫВ

### официального оппонента на диссертационную работу

Буляккулова Марселя Маратовича

на тему «Взаимодействие высокоскоростного гетерогенного потока с элементами конструкции ЛА», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

### Актуальность темы исследования.

Диссертация Буляккулова М.М. посвящена исследованию механизма взаимодействия поверхности элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) с обтекающими их гетерогенными потоками. Перечень различной техники, при эксплуатации которой приходится сталкиваться с взаимодействием поверхности элемента конструкции с гетерогенным потоком, достаточно большой. Например, при преодолении КЛА пылевой и дождевой облачности, при взаимодействии конструкции ЛА со струями РДТТ, в газогенераторах, в газовых и паровых турбинах, при обработке деталей (абразивная технология) и т.д. Поверхности элементов перечисленных конструкций, наряду с термохимическим и силовым воздействием газового потока, испытывают также и термоэрозийное и механическое воздействие со стороны твердых частиц. Что непременно сказывается на их жизненном ресурсе. Поэтому исследование выбранной темы является безусловно актуальной.

### Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по работе и списка литературы; содержит 176 страниц, 82 рисунка, 6 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование. Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным правилам и стандартам.

**Первая глава** представляет собой критический обзор сфер применения гетерогенных потоков в различных отраслях техники. В этом плане остро стоит задача исследования процессов обтекания и взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью элементов конструкций объектов техники. В связи с указанным, цель обзора заключалась в сравнения возможных энергетических режимов гетерогенных

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № \_\_\_\_\_  
03.12.2018.

потоков, способов и средств их моделирования на различных типах экспериментальных установок. Определены основные силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу. Отмечены особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего газового потока, которые заложены в коэффициенте аэродинамического сопротивления  $C_D$ . Проанализированы зависимости для вычисления значений коэффициента сопротивления  $C_D$  для частиц сферической формы разной дисперсности.

**Вторая глава** посвящена вопросам диагностики параметров высокоскоростных гетерогенных потоков, реализованных на газодинамических стендах. Проведен критический анализ использованных в работе методов и средств диагностики, оценены погрешности определения параметров.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию газодинамики обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком головной части ЛА конической формы, притупленной сферой. Указаны для расчётов реализуемые в реальной практике термо-газодинамические и геометрические исходные данные. Проведено с использованием программного комплекса ANSYS решение численным методом задачи взаимодействия «К-фазы» с поверхностью головной части ГЛА. Представлены визуализация результатов численного моделирования, а также результаты анализа полученных в расчёте данных, в широком диапазоне изменения дисперсности и скорости частиц в набегающем потоке.

**В четвертой главе** составлена математическая модель и приведено решение задачи натекания сверхзвуковой гетерогенной полидисперсной струи конечных размеров на преграду. В результате решения поставленной задачи получены соотношения, которые позволяют определить:

- скорости частиц разной дисперсности в гетерогенном потоке, вызывающих эрозию поверхности материала, в момент удара о преграду;
- температуру в зоне контакта при ударе высокоскоростных частиц полидисперсного гетерогенного потока о преграду.

Проведенный в главе анализ позволил установить несколько режимов, реализующихся при взаимодействии сверхзвукового гетерогенного потока с плоской стенкой, а также монотонное стремление температуры частиц  $T_p$  к температуре газа в сжатом слое. В частности, показано, что все частицы субмикронного диапазона не достигают поверхности преграды и сносятся вниз по потоку, то есть не взаимодействуют с поверхностью. Диаметр таких частиц обратно пропорционален плотности материала. В главе также показано, что динамика удара твердой частицы о преграду принципиально отличается от динамики удара жидкой частицы. В сверхзвуковых гетерогенных потоках, в которых уровни скоростей частиц достигают



значений  $V_p = 600 \div 1200$  м/с, динамическое давление в зоне контакта может достигать максимальных значений – до  $\sim 10^{10}$  Па. Это значительно превосходит предельные значения механических свойств большинства материалов. Установлено, что ударное действие динамического давления вызывает как разрушение поверхностного слоя материала, так и дробление падающих частиц.

**В пятой главе** проведен анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды из металлических и неметаллических материалов. Например, для углеродистых и легированных сталей установлено наличие критического значения температуры  $T_{кр}$ , при достижении которой и дальнейшем повышении температуры поверхности, безразмерная скорость разрушения материала резко возрастает. В данной главе проведено также исследование особенностей механизма разрушения неметаллических материалов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков. Исследование приведено на примере анализа экспериментальных данных разрушения стеклопластика ТЗМКТ-8. Как известно композиционные материалы этого класса широко используются в конструкциях изделий авиационной и ракетной техники. Наряду с этим в главе проведены исследования механизма разрушения углерод-углеродных композиционных материалов двух типов: УУКМ-1 и плотного кристаллического графита В-1. Проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния угла атаки частиц на обрабатываемую поверхность поликристаллического графита В-1 (см. рисунок 18). Установлено, что с увеличением угла атаки частиц, значение эрозионной скорости уноса массы поликристаллического графита В-1 более чем в два раза возрастает по сравнению с аналогичным параметром при нулевом угле атаки. Причём с увеличением скорости частиц влияние угла атаки проявляется более существенно.

### **Научная новизна**

Научная новизна проведенного в диссертационной работе исследования заключается в следующем:

- предложена математическая модель, позволяющая решить задачу обтекания высокоскоростным гетерогенным потоком летательный аппарат заданной формы;
- предложены алгоритмы и соотношения, позволяющие определить параметры гетерогенного потока при натекании и взаимодействии с преградой;

– получены характеристики эрозионного разрушения ряда конструкционных материалов.

### **Практическая значимость**

Практическая ценность диссертации состоит в том, что полученные в ней данные и сформулированные рекомендации могут использоваться в процессе проектирования высокоскоростных летательных аппаратов и в учебном процессе ВУЗов авиационного и ракетно-космического направления.

### **Достоверность**

Научные положения, выводы и рекомендации диссертации являются достоверными, так как они получены на основании решения фундаментальных уравнений: уравнений сохранения массы, количества движения, энергии и уравнения состояния. А также подтверждены удовлетворительным совпадением результатов численного моделирования с результатами стендовых экспериментов.

### **Замечания.**

Вместе с тем по работе можно сделать следующие замечания:

1. В диссертации недостаточно полно отражено влияние массовой концентрации частиц на термо-газодинамику течения высокоскоростного неизотермического гетерогенного потока, как в свободном пространстве, так и в пограничном слое. Например, в ряде опубликованных работ по данной тематике отражено взаимодействие между собой частиц твёрдой фазы, что исключено в данной работе.

2. К недостатку работы можно отнести также то, что автор не достаточно полно исследовал характеристики разрушения конструкционных и теплозащитных материалов.

3. Предложенные в работе соотношения для расчёта параметров разрушения ТЗМ получены на полуэмпирической основе, что сужает их область применения.

4. В диссертации и автореферате имеется ряд опечаток, непонятных сокращений.

### **Заключение**

Несмотря на указанные недостатки, диссертация Буляккулова Марселя Маратовича выполнена на высоком научно-техническом уровне, соответствующем ученой степени кандидата технических наук. На основе численного моделирования и современных экспериментальных методов в



диссертации получены новые научные результаты по качественным особенностям и количественным характеристикам процесса взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с преградой. На основе полученных результатов сформированы практические рекомендации по применению приведенных алгоритмов и соотношений.

Основные результаты диссертации изложены в 6 публикациях (в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК), и докладывались на 5 научных конференциях, в том числе на 2 международных.

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные результаты.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.14. – "Теплофизика и теоретическая теплотехника".

Считаю, что диссертационная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Буляккулов Марсель Маратович, несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14. – "Теплофизика и теоретическая теплотехника".

Доктор технических наук по специальности: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, - главный научный сотрудник, доктор наук отдела 016 Публичного акционерного общества "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"

Дата 30.11.18 подпись  Герасимов Юрий Иванович

Почтовый адрес: ул. Ленина, д. 4А, г. Королёв, Московская обл., Россия, 141070

Контактный телефон: 495-513-68-86

Адрес электронной почты: yury.gerasimov@rsce.ru

Подпись Пис. д.т.н. Герасимова Ю.И. удостоверяю:  
Ученый секретарь совета ПАО РКК «Энергия»



Хатунцева О.Н.

« 30 » 11 2018 г.