

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Тушканова Алексея Сергеевича «Термически и химически неравновесные процессы в факеле маршевого двигателя твердого топлива», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

### **Актуальность темы диссертации**

Вычислительный эксперимент наряду с физическим и натурными экспериментами является одним из основных способов исследования и получения новых знаний в различных областях науки и техники. Практическая реализация возможностей математического моделирования существенно повышает эффективность инженерных разработок – особенно при создании принципиально новых, не имеющих прототипов машин и приборов, материалов и технологий, что позволяет сократить существенно затраты времени и средств. В настоящее время математическое моделирование используют не только в качестве расчётно-теоретического сопровождения на стадии отработки технического устройства, но и при его проектировании, подборе и оптимизации его эксплуатационных режимов, анализе его надёжности и прогнозировании отказов и аварийных ситуаций, а также при оценке возможностей улучшения характеристик и модернизации технических устройств.

Освоение новых скоростей полёта приводит к необходимости разработок новых расчетных методик для моделирования физико-химических процессов, происходящих при гиперзвуковом полете в плотных слоях атмосферы, догорания в факеле ракетного двигателя, в ударной волне, возникающей при входе в плотные слои атмосферы, при выборе точки подачи горючего в высокоскоростных прямоточных двигателях и других аналогичных задач.

Используемое в настоящее время коммерческое программное обеспечение для проведения инженерных расчетов, не всегда применимо для расчетов перспективных изделий, например, гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Но представленные в них модели содержат эмпирические константы, определяющие точность результатов моделирования. Ввиду сложности и дороговизны проведения натуральных экспериментов выбор оптимальных значений констант в подобных моделях представляет собой сложную задачу. К тому же, в коммерческом ПО, зачастую

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Лх. №  
10 12 2019

невозможно изменять уравнения, образующие математическую модель, либо добавить в модель новые уравнения.

Актуальность работы обусловлена необходимостью расчётно-теоретического сопровождения летательных аппаратов с целью формирования их облика, а также при оценке возможностей улучшения характеристик.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность научных положений и выводов, представленных в работе, основана на использовании известных численных методов решения задач механики сплошных сред и математических моделей, адекватно описывающих объекты предметной области.

Постановка задач исследования и предлагаемые Тушканова А.С. методы их решения представляются обоснованными и выполненными на высоком научно-техническом уровне. Основные научные положения диссертации и выводы достаточно хорошо обоснованы, опираются на экспериментальные данные других авторов, опубликованные в известных отечественных и зарубежных изданиях.

#### **Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

**Достоверность** представленных в работе результатов подтверждается использованием при математическом моделировании гиперзвуковых течений фундаментальных законов и уравнений газовой динамики; учетом основных физико-химических процессов, реализующихся в гиперзвуковом потоке; использованием достоверных теплофизических данных; применением современных методов реализации математических моделей; удовлетворительным согласованием результатов математического моделирования с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

Достоверность так же подтверждается апробацией разработанных методов на решении большого спектра практических задач, сравнении расчетов с другими известными методами и натурными экспериментами, публикацией полученных результатов в рецензируемых журналах.

**Новизна** результатов, полученных соискателем, состоит в следующем:

1. Разработан и реализован метод расчета высокоскоростных струй с неравновесными химическими и термическими реакциями.
2. Разработан и реализован метод влияния горения на турбулентность, путем решения дополнительных уравнений переноса дисперсий концентраций и энтальпии.

3. Предложена модификация SST модели турбулентности с учетом влияния высокоскоростной сжимаемости.

5. Получены новые результаты по влиянию турбулентности на воспламенение и срыв горения.

6. Проанализирован характер движения частиц твердой фазы в факелах РДТТ на высотах полета от 30 до 100 км, для различных размеров частиц от 1 до 6 мкм.

### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанная модель течения высокоскоростного реагирующего потока реализована в программном коде, и может быть применена при расчете химически реагирующих, турбулентных струй.

Практическая ценность результатов заключается в возможности их использования при проектировании высокоскоростных прямоточных двигателей, ракетных двигателей, выдачи рекомендаций при выборе точки подачи горючего, расчета теплозащитного покрытия донной области ракеты, при расчете заметности ракет и т.д.

### **Краткая характеристика основного содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования; формулируется цель и основные задачи работы; описывается предлагаемый автором подход к решению поставленных задач; характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация

В **Разделе 1** приведен обзор литературы по тематике взаимодействия турбулентности с горением, влиянию переменных чисел Прандтля/Шмидта. Рассмотрены наиболее часто используемые подходы к моделированию влияния турбулентности на скорости химических реакций (ТСИ), а так же влияние химических реакций на турбулентность, посредством учета переменности турбулентных чисел Прандтля/Шмидта. Приведены два наиболее часто применяемые модели ТСИ – модели класса PaSRи модели, основанные на функции плотности вероятности.

В **Разделе 2** представлена модель течения с неравновесными физико-химическими реакциями. Для описания газовой динамики применялась система уравнений Навье-Стокса, дополненная уравнениями: состояния, химической кинетики, турбулентности, а также уравнениями для конденсированной фазы.

В **Разделе 3** была проведено тестирование предложенной модели, учитывающей влияние сжимаемости, термическую и химическую неравновесности, а так же переменные значения турбулентных чисел Прандтля/Шмидта. Апробация проводилась путем

моделирования различных экспериментов, и сопоставлением с экспериментальными данными.

В Разделе 4 было проведено параметрическое исследование типичных ракетных двигателей (жидкостных и твердотопливных).

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.14 в пунктах «Исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии» и «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

#### **Достоинства и недостатки работы**

Диссертация Тушканова А.С. является завершённой работой, в которой представлена разработанная автором математическая модель процессов термогазодинамики, тепло- и массообмена в высокоскоростных, турбулентных, химически активных струях летательных аппаратов. Подтверждена достоверность параметров течения, получаемых с использованием этой модели.

Однако работа не лишена некоторых недостатков:

1. Представляется недостаточно обоснованным на стр. 11 автореферата допущение о независимости функций плотностей вероятностей для температуры и массовых долей химических компонентов при расчете осредненных скоростей реакций. На этом допущении основан учёт влияния турбулентности на скорости химических реакций, поэтому требуется более строгое его обоснование. Интуитивно следует ожидать обратного, т.е. что скорость, давление, температура и концентрации веществ при горении будут взаимосвязаны и оказывать сильное взаимное влияние друг на друга.
2. В работе уделено недостаточно внимания сравнению результатов расчетов при использовании различных способов учета влияния турбулентных пульсаций на горение.
3. В настоящее время моделирование горения является одной из основных задач вычислительной механики сплошных сред. Поэтому в списке использованной литературы хотелось бы видеть больше ссылок на работы последних лет. Кроме того, автором разработаны оригинальные модели, создан комплекс программ и получены интересные численные результаты, которые, к сожалению, недостаточно полно опубликованы.
4. Текст изобилует неточностями и жаргонными выражениями. Например, на стр. 11 автореферата сказано: «... используется подход, основанный на функции распределения плотности вероятностей (ФРПВ)», далее следует ссылка на (18). В литературе по моделированию турбулентных течений упоминают, что данный подход основан на многомерной функции плотности вероятности (ФПВ), а (18) есть не что иное как среднее значение функции. Если автор вкладывает особый смысл в (18), следует подчеркнуть

отличие от классического определения ФПВ. Следует избегать выражений "ламинарная химия" и "турбулентная химия", а так же выражений «результаты расчета с использованием упрощенной и полной химии», когда речь идёт о режиме течения рабочей среды и используемом редуцированном или детальном механизме горения топлива.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Тушканов Алексей Сергеевич заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Доктор физико-математических наук,  
научный сотрудник отдела «Специальные  
авиационные двигатели и химмотология»,  
ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»  
Сергей Иванович Мартыненко

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»  
111116 г. Москва, ул. Авиамоторная, 2.

[www.ciam.ru](http://www.ciam.ru)

[Martynenko@ciam.ru](mailto:Martynenko@ciam.ru)

Тел. (495)-362-40-25; 8-916-9876-079

**Подпись С.И. Мартыненко заверяю**

Учёный секретарь  
ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,  
доктор экономических наук, доцент  
Екатерина Викторовна Джамай

