

са и составляющей привносимой излучением экрана жаровой трубы. В качестве граничных условий использовались либо критериальные зависимости в областях более простых течений, либо разрешался сопряженная теплогидродинамическая задача. В последнем случае на входе задавались расход и температура, на выходе – статическое давление. Сама задача является геометрическим сектором камеры, на симметричные границы которых в ANSYS CFX накладывалось условие периодичности.

Проводилась верификация рабочей модели на основе результатов испытаний по термометрированию корпуса камеры сгорания. При сравнении результатов полученных термопарами с соответствующими точками расхождение значений составляло менее 5 процентов.

Исследование показало разницу в 150 °С между внутренней и внешней стенками корпуса камеры сгорания, что ранее математическими моделями описано не было. Расхождение обусловлено более точным расчетом движения воздуха во вторичной зоне камеры сгорания.

### **Список литературы**

1. *Кутателадзе С.С. , Борщанский В.М.* Справочник по теплопередаче: Справочное пособие. Л.: Госэнергоиздат, 1958.
2. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов / *В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин.* М.: Машиностроение, 1985. 216 с.

УДК 536.46

## **ЕДИНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ОТДЕЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ ДИБОРИДА АЛЮМИНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ОКИСЛИТЕЛЬНОМ ПОТОКЕ**

Папырин П.В., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, [ctpelok91@gmail.com](mailto:ctpelok91@gmail.com)

Сухов А.В., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Ягодников Д.А., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

*Ключевые слова:* математическое моделирование, частица диборида алюминия, горение, воспламенение.

Один из путей повышения эффективности двигательных установок (ДУ) летательных аппаратов (ЛА) связан с разработкой новых рецептур топливных составов. Способом повышения эффективности топлива может служить увеличение относительного содержания пористообразных металлов (магний, алюминий, бор). Однако их использование в качестве добавок наряду с очевидными преимуществами (высокая плотность и удельная теплота сгорания) имеет определённые

недостатки (высокий процент содержания конденсированной фазы в продуктах сгорания топлива, большие потребные времена пребывания). Для учёта этих недостатков в процессе разработки топливного состава и конструкции ДУ требуется существенная экспериментальная отработка.

С другой стороны, уровень развития современных ЭВМ позволяет производить численное моделирование достаточно сложных физических процессов без значительных материальных и временных затрат. Представляется целесообразным дополнять экспериментальную отработку новых топливных составов численными расчётами на ЭВМ.

С целью проведения такого расчёта для процессов воспламенения и горения отдельных частиц металлизированного горючего – диборида алюминия ( $AlB_2$ ), разработана математическая модель, позволяющая определить скорость изменения температуры и радиуса частицы, находящейся в газовом потоке, а так же скорость изменения толщины оксидной плёнки на поверхности частицы. Считается, что химические реакции взаимодействия алюминия и бора с кислородом протекают параллельно на поверхности частицы, пропорциональной мольной доле каждого элемента в сплаве диборида алюминия. Учитывается радиационный и конвективный теплообмен частицы с окружающей средой. В качестве критериев воспламенения частицы приняты условия полного испарения образующейся оксидной плёнки бора ( $B_2O_3$ ) и достижение частицей диборида алюминия температуры плавления оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Модель является полуэмпирической и основана на экспериментальных зависимостях кинетики реакций окисления и горения одиночных частиц бора и алюминия [1, 2, 3, 4].

На основе разработанной математической модели создана программа расчёта параметров воспламенения и горения частицы диборида алюминия. Программа написана на языке программирования C++, для решения системы уравнений используется метод Рунге-Кутты. В результате расчёта в программе получены аппроксимирующие кривые зависимостей времени индукции воспламенения и времени горения от начальных значений температуры окружающей среды, концентрации кислорода, температуры и диаметра частицы диборида алюминия. Для времени индукции воспламенения:  $\tau_{\text{восп}} = 2,139 \cdot 10^{11} \cdot T_b^{-3,566} \cdot r_0^{1,6857} \cdot T_0^{-0,245}$  в миллисекундах, где  $T_b$  подставляется в кельвинах,  $r_0$  – в микрометрах,  $T_0$  – в кельвинах (справедливо для диапазонов  $T_b$ : 2400 – 3300 К;  $r_0$ : 5 – 20 мкм;  $T_0$ : 300 – 1200 К). Для времени горения получена следующая зависимость:  $\tau_{\text{гор}} = 2,321 \cdot 10^{-3} \cdot T_b^{-0,032} \cdot r_0^{1,4756} \cdot n_{O_2}^{-1,145}$  в миллисекундах, где  $T_b$  подставляется в кельвинах,  $r_0$  – в микрометрах,  $n_{O_2}$  – относительная концентрация кислорода в воз-

духе (справедливо для диапазонов  $T_b$ : 2400 – 3300 К;  $r_0$ : 5 – 20 мкм;  $n_{O_2}$ : 0,1 – 0,23).

Для оценки точности и корректировки модели требуется проведение экспериментов с целью определения времени задержки воспламенения и времени горения частиц различного диаметра. В дальнейшем представляется целесообразным переход от одиночной частицы к совокупности частиц, а так же описание воспламенения и горения частицы совместно с описанием её движения в камере сгорания летательного аппарата.

*Работа выполнена при поддержке Гранта  
Ведущей научной школы России, проект НШ-9774.2016.8.*

### **Список литературы**

1. *King M.K.* Boron Ignition and Combustion in Air-Augmented Rocket Afterburners // Combustion, Science and Technology – 1972. V. 5. № 4. P. 155-164.
2. *Вовчук Я.И., Золотко А.Н., Клячко Л.А.* Время горения частиц бора с учетом влияния диффузионного и кинетического факторов // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977. С. 90 – 93.
3. *Гуревич М.А., Озеров Е.С., Юринов А.А.* О влиянии плёнки окисла на характер воспламенения алюминия // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14. №4. С. 50-55.
4. *Бекстед М.В.* Анализ данных по времени горения частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 5. С. 55 – 69.

УДК 621.454.2

### **МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ ЖРД**

Шаблий Л.С., Самарский университет, г. Самара, [shabliy@ssau.ru](mailto:shabliy@ssau.ru)  
Зубанов В.М., Самарский университет, г. Самара, [waskes91@gmail.com](mailto:waskes91@gmail.com)  
Степанов Д.В., Самарский университет, г. Самара, [crey93.stepanov@yandex.ru](mailto:crey93.stepanov@yandex.ru)

Применение технологий компьютерного моделирования при исследовании рабочих процессов в камере ЖРД позволяет повысить качество проектирования новых ЖРД и улучшить существующие. В настоящее время направление науки, связанное с исследованием химической кинетики горения, достаточно подробно освещено как на уровне описания эмпирических моделей [1, 2], так и методик моделирования различных го-