

## **Методические вопросы проектирования гиперзвуковых летательных аппаратов, связанные с исследованием абляции углеродных материалов в струях жидкостных ракетных двигателей**

© В.В. Горский, Е.Г. Ватолина, В.Г. Реш

ОАО «ВПК «НПО машиностроения», Московская область,  
г. Реутов, 143966, Россия

*Приводится методика численного решения сопряженной задачи об истечении в затопленное пространство струи продуктов сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), невязком обтекании этой струей затупленного тела вращения, изготовленного из углеродного материала (УМ), о нестационарном нагреве и обгаре этого тела. Данная методика предназначена для определения проектных характеристик гиперзвуковых летательных аппаратов, характеризующихся существенным изменением внешних обводов их высокотемпературных элементов, обусловленных их обгаром.*

**Ключевые слова:** нестационарный прогрев, углеродный материал, гиперзвуковой летательный аппарат, жидкостный ракетный двигатель.

**Введение.** Испытания высокотемпературных элементов гиперзвуковых летательных аппаратов в струях продуктов сгорания ЖРД относятся к числу основных элементов стендовой наземной отработки изделий указанного типа.

В работе [1] впервые удалось решить весь комплекс задач, связанных с осесимметричным обтеканием, нагревом и обгаром тепловой защиты применительно к условиям полета осесимметричных затупленных тел в атмосфере Земли. При этом весь комплекс перечисленных задач проводился в строгой сопряженной постановке, но в качестве теплозащитного материала, из которого изготовлен обгорающий элемент изделия, рассматривались только стеклопластики.

В данной работе приводится аналогичная методика комплексного сопряженного расчета, относящаяся к условиям испытания теплозащитных материалов в струях ЖРД. При этом процесс прогрева испытываемой модели проводится в двухмерной нестационарной постановке, а процесс уноса массы тепловой защиты проводится в рамках полной термохимической модели разрушения углеродных материалов, описанной в работах [2, 3].

**Физико-математическая постановка задачи.** При такой постановке задачи рассматривается физико-математическое описание процесса изменения на заданном временном интервале обгарной формы

осесимметричной модели, изготовленной из УМ, которая обтекается струей продуктов сгорания ЖРД.

При этом для расчета параметров струи продуктов сгорания ЖРД, истекающей в затопленное пространство, применялась программа, предложенная в [4], в которой используются параболизированные уравнения Навье – Стокса [5] для описания течения газа в центральной части струи и уравнения турбулентного пограничного слоя [6] для описания процесса перемешивания струи с окружающей средой, а расчет турбулентной вязкости проводится с использованием теории пути перемешивания Л. Прандтля [7].

Для расчета обтекания модели текущей обгарной формы идеальным газом поверхность этой модели условно подразделяют на затупленную часть и боковую поверхность. При этом граница раздела между этими поверхностями автоматически смещается в процессе расчета по мере обгара модели.

Для решения задачи обтекания затупленной части модели идеальным газом используется программа, в рамках которой в каждом расчетном узле ударного слоя допускается существование термодинамического равновесия. Решение находим методом установления в сферической системе координат, центр которой расположен в точке пересечения оси тела с концевым сечением его затупленной части [8].

Для решения задачи обтекания боковой поверхности модели идеальным газом используется программа, составленная в соответствии с методикой работы [9] и апробированная на табличных данных работы [10]. В рамках этой программы также в каждом расчетном узле ударного слоя допускается существование термодинамического равновесия, а решение находим маршевым методом Мак-Кормака [11] в цилиндрической системе координат.

Расчет интенсивности конвективного теплообмена на поверхности модели производится в рамках метода эффективной длины В.С. Авдусевского [12] в сочетании с методом средних массовых величин В.В. Лунова [13]. При этом допускается возможность усиления интенсивности теплообмена за счет шероховатости поверхности модели на базе использования рекомендаций, изложенных в работе [14]. Расчет месторасположения переходной области на поверхности модели, где наблюдается переход от ламинарного режима течения газа в пограничном слое к турбулентному режиму, проводится в соответствии с методикой, рассмотренной в работах [15, 16]. Расчет интенсивности теплообмена в переходной области базируется на применении методики [17]. Введение в расчет теплообмена давления, полученного в результате проведения невязкого газодинамического расчета, базируется на методике, приведенной в [1]. Все используемые при расчете интенсивности теплообмена соотношения описаны, в частности, в монографиях [1, 18].

Расчет свойств газовой смеси в пограничном и ударном слоях производился путем аппроксимации табличных данных, построенных с использованием программы [19].

Для расчета абляционных характеристик УМ в данной работе используется современная полная термохимическая модель уноса массы углерода, сформулированная в работах [2, 3]. Принципиальным отличием этой модели уноса массы углерода от аналогичных, ранее опубликованных в литературе [20–22], является учет взаимного влияния друг на друга процессов сублимации и окисления углерода. В этих работах процесс окисления углерода рассматривался в диффузионном приближении, что приводило к невозможности участия испарившихся молекул углерода в химических реакциях, протекающих на поверхности тела, обтекаемой газовым потоком (для этой поверхности будем использовать термин «стенка»). В рамках же полной термохимической модели уноса массы углерода окисление последнего рассматривается в кинетической постановке. Это приводит к тому, что с ростом температуры «стенки» автоматически возникает режим, близкий к диффузионному режиму, на котором концентрация свободного кислорода на «стенке» достаточно мала, но не равна нулю, что дает возможность учета химического взаимодействия между продуктами сублимации углерода и остальными компонентами газовой смеси на «стенке».

В условиях испытания в струе продуктов сгорания ЖРД моделей, изготовленных из УМ, сублимационный режим окисления углерода практически никогда не реализуется. Однако при этом использование полной термохимической модели окисления углерода является строго необходимым в силу того, что диффузионный режим окисления углерода в этих условиях может и не реализоваться как на всей поверхности модели, так и на ее части.

Изменение текущей обгарной формы модели, соответствующее рассчитанным абляционным свойствам тепловой защиты, производится в рамках метода работы [23], что обеспечивает устойчивость данной расчетной процедуры.

При расчете обгара тепловой защиты, характеризующейся малым значением коэффициента теплопроводности, расчет изменения обгарной формы модели в первом приближении можно производить с использованием параметров уноса массы тепловой защиты, определенных в квазистационарной постановке [24].

Однако для моделей, изготовленных из УМ, использование такого подхода является однозначно недопустимым, так как у материалов этого класса коэффициент теплопроводности на два порядка выше, чем у стеклопластиков.

В связи с этим, в рамках данной методики расчет прогрева проводится в двумерной нестационарной постановке, в которой полная

термохимическая модель уноса массы углерода используется для формирования граничных условий на «стенке». При этом допускается учет анизотропии в теплофизических характеристиках материала, а расчет проводится в системе координат, обеспечивающей прямоугольность области определения температуры и погрешность второго порядка аппроксимации дифференциальных операторов на неравномерной сетке. Решение данной задачи найдем методом матричной прогонки [25].

Описанная методика расчета реализована в виде комплексной программы для ПЭВМ, написанной на языке FORTRAN.

**Результаты испытания.** Объектом расчетно-теоретического анализа, результаты которого приводятся ниже, является модель, изготовленная из современного УМ. Испытания проводились в струе кислородно-водородного двигателя. Среднее значение отношения массовых концентраций кислорода и водорода в ядре струи двигателя равнялось 9, а давление торможения в камере сгорания двигателя составляло 128,48 кгс/см<sup>2</sup>.

Форма передней части модели наконечника после испытания – коническая, ровная, симметричная. Суммарный линейный унос вдоль оси симметрии образца составил 1,1 характерного линейного размера тела.

**Результаты расчетов.** Расчеты проводились с использованием программы, описанной ранее. Свойства газа (энтальпия «стенки», плотность, коэффициент динамической вязкости) рассчитывались по программе [19]. По полученным результатам построены аппроксимационные зависимости:

$$H = 0,31T^2 + 1530,57T - 12474972,41,$$

$$\ln(\mu\rho/P) = -0,01x^4 + 0,57x^3 - 12,04x^2 + 113,93x - 427,60,$$

$$\rho(H - 124749,41)/P = -5,28 \cdot 10^{-15}x^2 + 3,30 \cdot 10^{-7}x + 3,56.$$

Здесь  $T$  – температура, К;  $H$  – энтальпия, Дж/кг;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $x = H - 12474972,41$ .

Расчеты проведены с учетом усиления теплообмена за счет шероховатости, но без учета эффекта завихренности, что обусловлено малой величиной числа Маха в набегающем на образец газовом потоке. Значения шероховатостей поверхности материала использовались те же, что и в работе [1], посвященной исследованию уноса массы стеклопластиков (т. е. для расчета местоположения переходной области на поверхности тела использовалась величина шероховато-

сти поверхности, равная 40 мкм, а для расчета усиления интенсивности теплообмена, обусловленного шероховатостью, – величина последней, равная 10 мкм).

Расчет скорости окисления углерода компонентами газовой смеси на поверхности материала проводился в кинетической постановке. При этом предполагалось, что в реакции окисления углерода участвуют только чисто кислородные соединения. Скорость окисления углерода рассчитывалась по формуле

$$G_{Ox} = \rho_w \frac{M_C}{M_O} (C_{O,w} + C_{O_2,w}) 1,15 \cdot 10^{10} \exp\left(-\frac{20650}{T_w}\right).$$

Здесь  $G_{Ox}$  – массовая скорость окисления, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho_w$  – плотность газовой смеси на «стенке», кг/м<sup>3</sup>;  $M_C, M_O$  – молярные массы атомарных углерода и кислорода, кг/кмоль;  $C_{O,w}, C_{O_2,w}$  – массовые концентрации атомарного и молекулярного кислорода на «стенке»;  $T_w$  – температура «стенки», К.

Эта формула базируется на высказанном в работе [2] предположении о том, что в окислительных газовых потоках скорость окисления углерода пропорциональна концентрациям только чисто кислородных веществ на «стенке» независимо от химического состава этих потоков.

При исследовании обгара УМ при больших значениях давлений торможения набегающего газового потока необходимо учитывать механический унос массы углерода, в данной работе он проводился с использованием формулы

$$G_{\text{мех}} = \begin{cases} 0, p_e \leq p_{e,\text{min}}, \\ a_{\text{мех}} \left[ \exp\left(\frac{p_e}{p_{e,\text{min}}} - 1\right) - 1 \right], p_e > p_{e,\text{min}}. \end{cases}$$

Здесь  $G_{\text{мех}}$  – скорость механического уноса массы углерода, кг/м<sup>2</sup>·с;  $p_e, p_{e,\text{min}}$  – давление на внешней границе пограничного слоя и его минимальная величина, начиная с которой учитывается механический унос массы углерода, Па;  $a_{\text{мех}}$  – коэффициент пропорциональности, кг/м<sup>2</sup>·с.

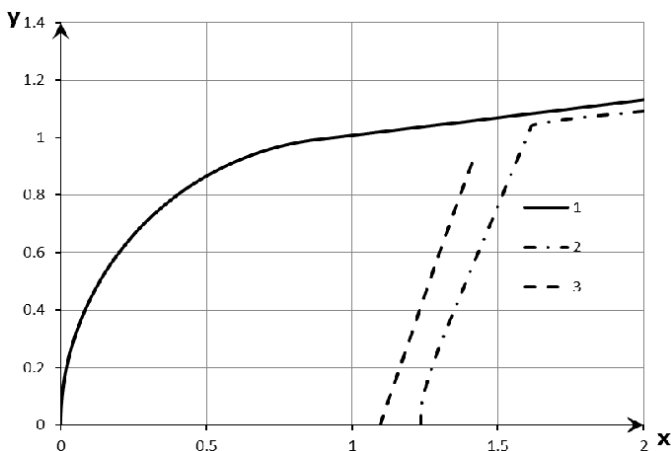
Значение коэффициента пропорциональности  $a_{\text{мех}}$  определяется на базе сопоставления расчетно-теоретических и экспериментальных

данных по обгару модели, изготовленной из УМ, в струе продуктов сгорания ЖРД.

Пример решения задачи такого рода приводится ниже.

Расчет проводился в квазистационарной постановке в течение 9 с, а результаты этого расчета, приведенные на рисунке, соответствуют последнему моменту времени и значению коэффициента  $a_{\text{мех}}$ , равному  $4,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

На рисунке 1 приведены также исходная форма модели, результаты и экспериментальные данные (длительность эксперимента составила примерно 9 с).



### Изменение геометрии тела в процессе обгара:

1 – исходная форма модели; 2 – результаты расчета; 3 – экспериментальные данные

Из представленных результатов следует, что в рамках предложенной методики расчета наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

**Выводы.** Сформулирована методика комплексного сопряженного расчета обтекания нагрева и обгара осесимметричных затупленных моделей, изготовленных из углеродных материалов, в газовых струях сложного химического состава, которая учитывает современное состояние физико-математического описания всех основных процессов, сопутствующих протеканию данного явления.

Разработана комплексная программа расчета для ПЭВМ, реализующая предложенную методику, использование которой дает возможность качественного повышения информативности экспериментальной отработки тепловой защиты в струях ЖРД и, тем самым, качества ее проектирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 2010-01-00841а).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горский В.В., Носатенко П.Я. *Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена при аэротермохимическом разрушении композиционных теплозащитных материалов на кремнеземной основе*. Москва, Научный мир, 2008, 255 с.
- [2] Горский В.В., Полежаев Ю.В. Горение графита в высокотемпературных окислительных газовых потоках. В кн.: *Законы горения*. Москва, УНПЦ «Энергомаш», 2006, с. 303–324.
- [3] Горский В.В., Оленичева А.А. Исследование процесса уноса массы углеродного материала в рамках полной термохимической модели его разрушения для случая равновесного протекания химических реакций в пограничном слое. *Теплофизика высоких температур*, 2012, т. 50, № 2, с. 307.
- [4] Сафронов А.В. Численный метод расчета струй продуктов сгорания при старте ракет. *Космонавтика и ракетостроение*, 2007, вып. 1(46), с. 72–79.
- [5] Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчен Р. *Вычислительная гидромеханика и теплообмен*. Москва, Мир, 1990.
- [6] Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. Москва, ИЛ, 1956, 528 с.
- [7] Prandtl L. Ueber die ausgebildete Turbulenz. *ZAMM*, 1925, vol 5.
- [8] Лебедев М.Г., Пчелкина Л.В., Савинов К.Г. Решение задач газовой динамики методом установления. *Науч. тр.* Москва, Институт механики МГУ, 1972, № 19, с. 7–38.
- [9] Кутлер П., Рейнхардт В.А., Уорминг Р.Ф. Метод расчета пространственного сверхзвукового течения со скачками уплотнения с учетом эффектов реального газа. *Ракетная техника и космонавтика*, 1973, т. 11, № 5. с. 103–111.
- [10] Лунев В.В., Магомедов К.М., Павлов В.Г. *Гиперзвуковое обтекание призматических конусов с учетом равновесных физико-химических превращений*. Москва, Вычислительный центр АН СССР, 1968, 203 с.
- [11] MacCormack R.W. The Effect of the Viscosity in Hypervelocity Impact Cratering. AIAA, Cincinnati, Ohio, 1969, vol. 69, p. 354.
- [12] Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике*. Кошкина В.К., ред. Москва, Машиностроение, 1975, 623 с.
- [13] Лунев В.В. Метод среднemasсовых величин для пограничного слоя с поперечной неоднородностью. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1967, № 1.
- [14] Powars C.A. Roughness effects augment heating data correlation and analysis. *PANT*. Part 11. SAMSO TR-74-86.
- [15] Phinney R.E. Mechanism for Heat-transfer to a Rough Blunt Body. *Letters in heat and mass transfer*, 1974, vol. 1(2).
- [16] Anderson A.D. Surface roughness effects. Boundary layer transition data correlation and analysis. *PANT*. Part 11. SUMCO TR-74-86.
- [17] Саффуллин Р.А. Теплообмен в области перехода пограничного слоя в турбулентный. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1971, № 6, с. 92–96.
- [18] Горский В.В., Ватолина Е.Г., Братчев А.В. *Математическое моделирование тепловых и газодинамических процессов при проектировании современных летательных аппаратов*. Горский В.В., ред., Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 213 с.

- [19]Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. Москва, Центр программных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992.
- [20]Анфимов Н.А. Горение графита в потоке воздуха при высоких температурах. *Известия АН СССР. Механика и машиностроение*, 1964, № 5, с. 3–11.
- [21]Scala S. M., Gilbert L. M. Sublimation of graphite at hypersonic speeds. *AIAA Journal*, 1965, v. 3 (9), pp. 87–100.
- [22]Завелевич Ф.С. Горение графита в химически равновесном пограничном слое. *Механика жидкости и газа*, 1966, № 1, с. 161–167.
- [23]Знаменский В.В. Численное решение уравнения обгара. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1978, № 2, с. 147–154.
- [24]Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. Москва, Энергия, 1976, 391 с.
- [25]Самарский А.А. *Введение в теорию разностных схем*. Москва, Наука, 1971, 552 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Горский В.В., Ватолина Е.Г., Реш В.Г. Методические вопросы проектирования гиперзвуковых летательных аппаратов, связанные с исследованием абляции углеродных материалов в струях жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/aero/839.html>

**Горский Валерий Владимирович** – главный научный сотрудник ОАО «ВПК «НПО машиностроения», д-р техн. наук, профессор. Область научных интересов: абляционная тепловая защита, высокотемпературный тепломассоперенос, численные методы решения уравнений математической физики. e-mail: [gorskknat@yandex.ru](mailto:gorskknat@yandex.ru).

**Ватолина Елена Геннадьевна** – родилась в 1966 г., окончила Московский авиационный институт им С. Орджоникидзе в 1986 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «ВПК «НПО машиностроения». Область научных интересов: тепломассообмен. Автор 20 работ. e-mail: [vatolinaelena@rambler.ru](mailto:vatolinaelena@rambler.ru).

**Реш Владислава Георгиевна** родилась в 1963 г., окончила Московский физико-технический институт в 1986 г. Инженер I категории ОАО «ВПК НПО «машиностроения». Область научных интересов: тепломассообмен. Автор 9 работ. e-mail: [resch883@rambler.ru](mailto:resch883@rambler.ru).