

К вопросу о необходимости корректировки метода Ю.Д. Пчелкина, предназначенного для инженерного расчета параметров уноса массы углеродных материалов в окислительных газовых потоках

© В.В. Горский

АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов, Московская обл., 143966, Россия
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Изменение формы высокотемпературных элементов конструкции скоростных летательных аппаратов, которое обусловлено обгаром их тепловой защиты, в значительной степени сказывается на аэродинамических, массово-инерционных и центровочных характеристиках этих аппаратов, поэтому большое значение приобретают вопросы, связанные с разработкой методики, позволяющей расчетным путем предсказывать скорость разрушения используемых в ракетно-космической отрасли теплозащитных материалов. В настоящее время широкое распространение на практике получило применение углеродных материалов. Для расчета скорости их термохимического и эрозионного разрушения широко используется инженерная методика Ю.Д. Пчелкина. Проведен анализ этой методики и показана необходимость внесения в нее определенных корректировок, учет которых может привести к существенному изменению результатов расчетов, что имеет большое прикладное значение.

Ключевые слова: абляция, эрозия, гетерогенное окисление, сублимация

Введение. Основы широко используемого в России расчетно-теоретического подхода к расчету абляции углеродных материалов сформулированы в статье [1] и подробно изложены в работе [2]. В рамках этого подхода предполагается, что процесс окисления углерода является многостадийным, включающим в себя:

- диффузионный подвод кислорода к стенке с внешней границы пограничного слоя;
- хемосорбцию кислорода стенкой;
- непосредственно гетерогенное химическое взаимодействие кислорода и углерода;
- десорбцию продуктов химической реакции в пограничный слой с возможным последующим химическим взаимодействием их с кислородом;
- диффузионный отвод продуктов химических реакций от стенки.

По достижении достаточно высоких температур стенки процесс окисления углерода выходит на диффузионный режим, на котором скорость абляции материала практически перестает зависеть от температуры стенки. При этом для расчета значения скорости предлага-

ется использовать простую формулу, полученную из балансов масс кислорода и углерода на стенке при ограничении набора веществ, составленных из этих элементов, только оксидом углерода.

В настоящей статье проанализируем расчетные соотношения, полученные с использованием этой формулы в работах [3, 4], не рассматривая вопрос об обоснованности ее применения при экстремально высоких температурах стенки, которые соответствуют сублимационному режиму абляции углерода.

Физико-математический анализ инженерной методики Ю.Д. Пчелкина. К инженерной методике расчета, опубликованной в работах [3, 4], имеются следующие замечания.

1. Методика сформулирована в квазистационарной постановке, а углеродные материалы относятся к такому классу абляционной тепловой защиты, для которого задачу прогрева и уноса массы следует рассматривать в нестационарной постановке. Это является следствием высокой теплопроводности указанных материалов.

2. Анализ приведенных в работах [3, 4] расчетных зависимостей показал, что и в квазистационарной постановке требуется их определенная корректировка, связанная с записью в этих работах баланса теплоты на стенке в форме:

$$(A_{h,im} - \eta G_{Abl})(H_{00} - H_w) - \varepsilon \sigma T_w^4 = G_{Abl} [\Delta Q_w + (L - 1) dH_C^s], \quad (1)$$

где $A_{h,im}$ — коэффициент теплообмена на непроницаемой стенке, кг/(м²·с); η — коэффициент вдува; H_{00} — энтальпия торможения набегающего потока воздуха, Дж/кг; H_w — энтальпия воздуха при температуре стенки; ε — степень черноты стенки; σ — константа Стефана — Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_w — температура стенки, К; ΔQ_w — тепловой эффект физико-химических превращений, протекающих на стенке, Дж/кг; L — отношение массовых скоростей газификации и абляции материала; dH_C^s — разность энтальпий конденсированного углерода, соответствующая его нагреву от исходного состояния до температуры стенки; G_{Abl} — массовая скорость абляции, кг/(м²·с).

Для теплового эффекта физико-химических превращений используется его значение 31,4 МДж/кг, характерное для теплового эффекта физико-химических превращений, протекающих на стенке при сублимационном режиме абляции углерода. Для расчета разности энтальпии конденсированного углерода используется аппроксимационная зависимость, построенная по данным из работы [5].

Отметим, что правильная запись баланса теплоты на аблирующей углеродной стенке имеет вид

$$(A_{h,im} - \eta LG_{Abl})(H_{00} - H_w) - \varepsilon \sigma T_w^4 = G_{Abl} [\Delta Q_w L + dH_C^S]. \quad (2)$$

Второе замечание к балансу теплоты, записанному в форме равенства (1), связано с использованием аппроксимационной формулы для расчета dH_C^S , приведенной в работах [3, 4] (рис. 1).

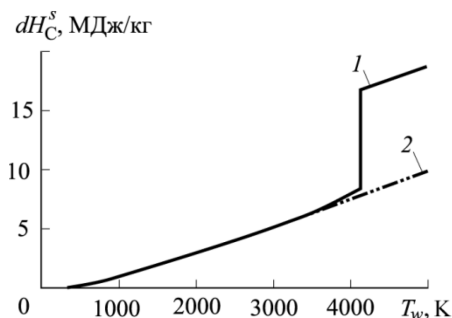


Рис. 1. Зависимость приращения энтальпии конденсированного углерода от температуры:
1 — по данным из работы [6]; 2 — по аппроксимационным формулам из работ [3, 4] и данным работы [5]

По данным на рис. 1 видно, что использование аппроксимационной формулы [3, 4] действительно позволяет с достаточно высокой точностью описать табличные данные работы [5]. Однако, согласно данным о термодинамических свойствах индивидуальных веществ [6], широко используемых в настоящее время, при температуре 4130 К углерод претерпевает фазовое превращение, которое приводит примерно к двукратному увеличению его энтальпии (в работе [5] указанному фазовому переходу соответствует температура 5000 К). В то же время следует отметить, что использование энтальпии конденсированного углерода при температурах выше 4000 К не представляется обоснованным, так как при этом, по данным разных авторов, наблюдается существенное различие указанных величин, обусловленное учетом процесса оплавления углерода.

3. Замечание к балансу теплоты (1). Оно относится к форме записи теплового эффекта физико-химических превращений, протекающих на стенке. Суть его состоит в том, что процесс газификации углерода характеризуется принципиально различными тепловыми эффектами при разных режимах его абляции.

Так, при диффузионном режиме окисления углерода кислород находится преимущественно в атомарном состоянии, вследствие чего тепловой эффект окисления ΔQ_{Ox} в этих условиях составляет

31,2 МДж/кг [6]. Среднее значение теплового эффекта ΔQ_{Sub} [3, 4] для сублимационного режима абляции углерода составляет 31,4 МДж/кг.

Указанные цифровые значения тепловых эффектов следует применять при различных режимах абляции углерода, а в балансе теплоты на стенке, записанного в форме равенства (1), всегда используется указанное выше значение теплового эффекта ΔQ_w .

С учетом изложенного окончательная форма записи баланса теплоты на стенке в квазистационарной постановке должна иметь вид

$$(A_{h,im} - \eta LG_{Abl})(H_{00} - H_w) - \epsilon \sigma T_w^4 = G_{Abl} (dH_C^s + L\Delta Q_{Ox}); \quad (3)$$

$$(A_{h,im} - \eta LG_{Abl})(H_{00} - H_w) - \epsilon \sigma T_w^4 = G_{Abl} (dH_C^s + L\Delta Q_{Sub}). \quad (4)$$

Уравнение (3) используется при диффузионном режиме окисления углерода, уравнение (4) — при сублимационном режиме его абляции.

В целях иллюстрации изменений, к которым приводит учет указанных выше факторов, приведены результаты квазистационарного решения задачи об абляции углерода, полученные на примере обтекания затупленного по сфере конуса потоком воздуха (при числе Маха $M = 20$) на высоте 10 км (рис. 2). При этом радиус сферы принимался равным 0,05 м, угол полураствора конуса — 10° .

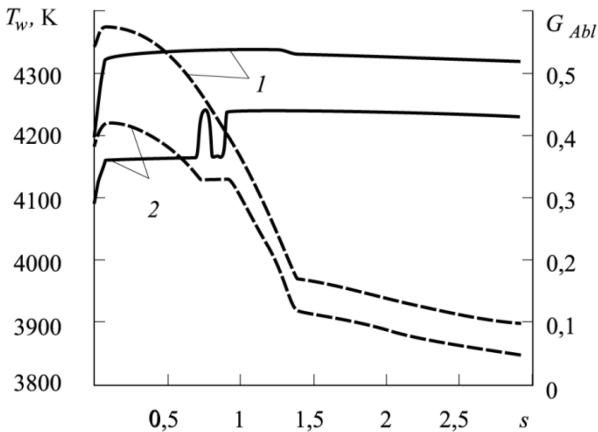


Рис. 2. Распределение квазистационарных параметров абляции углеродного материала на поверхности затупленного конуса в рамках метода работ [3, 4] в зависимости от криволинейной координаты, отсчитываемой вдоль образующей конуса в долях от радиуса его сферического затупления:

1 — расчет по исходной методике; 2 — расчет по модифицированной методике; — — — скорость абляции углеродного материала G_{Abl} , измеренной в долях от $A_{h,im}$; - - - температура стенки T_w , К

Нарушение монотонности, наблюдаемое в зависимости $G_{Abl}(s)$ на рис. 2, объясняется учетом фазового перехода, который происходит при температуре 4130 К.

Вывод. Установлен ряд неточностей в формулировке задачи об абляции углерода, приведенной в работах [3, 4]. Показано, что устранение их приводит к заметному изменению результатов инженерных расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00971 а).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анфимов Н.А. Горение графита в потоке воздуха при высоких температурах. *Известия АН СССР. Отдел технических наук. Механика и машиностроение*, 1964, № 5, с. 3–11.
- [2] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. *Тепловая защита*. Москва, Энергия, 1976, 391 с.
- [3] Пчелкин Ю.Д. Методика расчета абляции углеродных материалов в воздухе и ее приближения. В сб.: *Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений. Международная научно-техническая конференция. Тезисы докладов*. г. Жуковский: Издательский отдел ЦАГИ, 2004, с. 56–58.
- [4] Пчелкин Ю.Д. Приближенный метод расчета уноса массы углеродных материалов в высокотемпературном потоке. *Космонавтика и ракетостроение*, 2014, вып. 2 (75), с. 19–24.
- [5] Глушко В.П., Гурвич Л.В., Хучкурузов Г.А. и др. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник*. В 2 т. Москва, Изд-во АН СССР, 1962, т. II, 916 с.
- [6] Глушко В.П., Гурвич Л.В., Бергман Г.А. и др. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*. В 4 т. Москва, Наука, 1979, т. II, кн. 2, 341 с.

Статья поступила в редакцию 21.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Горский В.В. К вопросу о необходимости корректировки метода Ю.Д. Пчелкина, предназначенного для инженерного расчета параметров уноса массы углеродных материалов в окислительных газовых потоках. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-8-1645>

Горский Валерий Владимирович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник АО «ВПК «НПО машиностроения», преподаватель на кафедре «Вычислительная математика и математическая физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: теплообмен и тепловая защита. Автор более 150 научных работ. e-mail: gorskknat@yandex.ru

On the correction necessity of Yu.D. Pchelkin method proposed for carbon materials ablation parameters calculation in oxidation gas flows

© V.V. Gorskiy

Joint stock company Military and industrial corporation JSC MIC Mashinostroyenia,
Reutov, Moscow Region, Russia, 143966
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article describes physic mechanical analysis of the engineering technique developed by Yu.D. Pchelkin, which is designed to calculate the carbon materials loss mass parameters, shows the need to introduce certain adjustments into this methodology, which can lead to a significant change in the calculation results, is of great practical importance.

Keywords: ablation, erosion, heterogeneous oxidation, sublimation

REFERENCES

- [1] Anfimov N.A. *Izvestiya AN SSSR. OTN. Mekhanika i mashinostroyeniye—Proc. of the USSR Academy of Sciences: Department of Technical Sciences. Mechanical Engineering*, 1964, no. 5, pp. 3–11.
- [2] Polejaev Yu.V., Yurevich F.B. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, Energy Publ., 1976, 391 p.
- [3] Pchelkin Yu.D. Metodika rascheta ablyatsii uglerodnykh materialov v vozdukheiepriblizheniya [Method for calculating the ablation of carbon materials in the air and its approximation]. *V sb.: Fundamentalnye problemy vysokoskorostnykh techeniy. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Tez. dokladov* [In: Fundamental problems of high-growth currents. Proc. of International Scientific and Technical Conference]. Zhukovskiy, CAGI Publ., 2004, pp. 56–58.
- [4] Pchelkin Yu.D. *Kosmonavtika i raketostroyeniye — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2014, vol. 2 (75), pp. 19–24.
- [5] Glushko V.P., Gurvich L.V., Khuchkuruzov G.A., ed. *Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv. V 2 tomakh, tom II* [Thermodynamic properties of individual substances. Handbook in 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1962, 916 p.
- [6] Glushko V.P., Gurvich L.V., Bergman G.A., ed., *Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv* [Thermodynamic properties of individual substances]. In 4 volumes. Moscow, Nauka Publ., 1979, vol. II, book 2, 341 p.

Gorskiy V.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Research Scientist of Joint stock company Military and industrial corporation JSC MIC Mashinostroyenia. Since 1992 he has been teaching at the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 scientific publications. Research interests include heat exchange and thermal protection. e-mail: gorskmat@yandex.ru