

УДК 66.045.1: 621.452.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ УДАЛЕНИЯ КОКСОТЛОЖЕНИЙ В КАНАЛАХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЫЖИГАНИЯ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

© 2002 А. А. Харин, Л. С. Яновский

Российский государственный университет
инновационных технологий и предпринимательства

Приведены результаты экспериментального исследования скорости выгорания коксоотложений, образованных на внутренних стенках трубопроводов при термохимических превращениях топлив, в воздушном потоке. Предложена методика оценки скорости удаления коксоотложений из каналов топливных систем газотурбинных двигателей.

Условные обозначения

T, t - температура;

h - энтальпия газового потока;

τ - время выгорания коксоотложений;

W - скорость потока;

ρ - плотность;

p - давление;

μ - коэффициент динамической вязкости;

G - массовый расход;

\dot{Y} - поток массы продуктов горения;

L, d - длина и внутренний диаметр канала;

R_s - шероховатость поверхности;

R - радиус кривизны канала;

δ_{∂}^{**} - толщина потери массы;

x, y - продольная и поперечная координаты;

$\bar{x} = x/L$ - безразмерная продольная координата;

$e_1 = \frac{\dot{Y}_w}{(\rho_f w_f St)}$ - параметр проницаемости отложений;

D_{12} - коэффициент бинарной диффузии;

\bar{k}_i - весовая концентрация i -элемента в газовой смеси;

$\Delta \bar{k}_i$ - концентрационный напор i -элемента;

Re - число Рейнольдса: $Re_x = \rho_f w_f x / \mu_{f0}$;

$$Re_{\partial}^{**} = \frac{\rho_f w_f \delta_{\partial}^{**}}{\mu_{f0}};$$

St - число Стентона;

Sc - число Шмидта;

$\Psi = St / St_0$ - относительный закон тепло- (массо) обмена;

$\Theta = T_w / T_f$ - температурный фактор.

Индексы

w - стенка;

f - поток;

∂ - диффузионный;

0 - начальный;

волнистая черта сверху - осреднение по времени;

квадратные скобки - объемная концентрация.

Известно [1], что химико-термические методы удаления отложений позволяют достичь весьма высоких степеней очистки (80-100%). При этом метод выжигания отложений в высокотемпературном (1070-1270 K) воздушном потоке является одним из наиболее эффективных.

Большая энергоемкость процесса очистки деталей газотурбинных двигателей (ГТД) путем выжигания отложений обуславливает необходимость получения количественных оценок скоростей горения коксоотложений и их зависимостей от режимных параметров.

Имеется обширный материал по закономерностям горения твердого топлива [2], однако данные по горению коксоотложений во внутренних полостях трубопроводов ГТД практически отсутствуют.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования скоростей выгорания в воздушном потоке коксоотложений, образовавшихся на внутренних поверхностях топливопроводов.

Экспериментальное исследование закономерностей выгорания коксоотложений в потоке кислорода проводилось на установке микроэлементарного анализа [3]. Через трубку с отложениями, нагреваемую снаружи газовой горелкой до температур 1070-1270 K, продувался поток кислорода, а также его смесь с азотом с температурой $T_f = 273 K$, скорость которого при необходимости варьировалась. Температура наружной поверхности трубки измерялась термопарами и контролировалась оптическим пирометром ОП-ПИР-017 через кварцевую трубку, в которой размещалась металлическая трубка с отложениями. Температура стенки трубки незначительно изменялась по длине.

Интенсивность выгорания коксоотложений определялась по привесу массы погложительных аппаратов установки в течение эксперимента. Выжигание прекращалось после того, как привес массы становился равным нулю. После эксперимента трубка разрезалась по оси на две половины, и визуально (под микроскопом) проверялось отсутствие отложений. Как показано в ряде работ [4-9], режим выгорания углерода в потоке газа может быть кинетическим, диффузионным или переходным (диффузионно-кинетическим). В работе [8] установлено, что при температурах поверхности $T_w \approx 830 - 1100 K$ режим выгорания графита в воздушном потоке - кинетический. При увеличении температуры поверхности $T_w > 1100 K$ режим горения переходит в диффузионный. В этом переходном режиме скорость уноса массы определяется процессами, связанными как с гидродинамикой, так и с химической кинетикой. Для температур поверхности 1400-2800 K суммарная скорость уноса массы графита определя-

ется самым медленным процессом - диффузией в пограничном слое. В работе [9] установлено, что диффузионный режим реагирования графита в потоке воздуха при скоростях порядка 100 м/с наступает при $T_w > 1500 K$, что согласуется с данными работы [6].

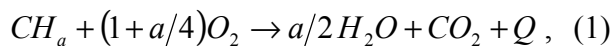
Для того чтобы найти область перехода от кинетического режима реагирования к диффузионному при выгорании коксоотложений, были проведены опыты при постоянных параметрах потока кислорода ($\rho_f w_f = 12 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$, $P_f \approx 0,11 \text{ МПа}$, $T_f = 298 K$). От опыта к опыту изменялась только температура стенки.

Переход от кинетического режима выгорания отложений к диффузионному зависит от температуры образования отложений, т. е. их структуры, а именно: переход от кинетического режима для отложений, образовавшихся при $T_{wo} \approx 570 K$, осуществляется при $T_w = 1130 K$; для отложений, образовавшихся при $T_{wo} \approx 670 K$ - при $T_w \approx 1170 K$; для отложений, образовавшихся при $T_{wo} \approx 670 K$, переход наступает при $T_w \approx 1220 K$.

Осмотр внутренней поверхности трубки после опытов в кинетическом и диффузионном режимах выгорания показал, что поверхность отложений в кинетическом режиме становится сильно шероховатой ($R_s \approx 250 \text{ мкм}$), а в диффузионном режиме - относительно гладкой ($R_s \approx 18 \text{ мкм}$). Аналогичное явление имеет место при горении графита [9]. Качественно такая картина имела место на всех образцах отложений, образованных при разных начальных температурах стенки. Однако количественно различие в средней высоте элементов шероховатости отложений в кинетическом и диффузионном режимах выгорания уменьшалось по мере уменьшения начальной температуры образования отложений. Различие в состояниях поверхности после горения в кинетическом и диффузионном режимах обусловлено, согласно [9], тем, что в кинетическом режиме на поверхности от-

ложений имеется избыток кислорода, который проникает в поры отложений, разрушая поверхность. С повышением температуры реакционная способность кокса возрастает, а поэтому глубина, на которую проникает кислород в пору, прежде чем прореагирует, уменьшается, что приводит к уменьшению шероховатости поверхности. Для того чтобы оценить возможное влияние механической эрозии (унос частиц отложений за счет сил трения и давления) и сублимации отложений на скорость их выгорания, были проведены опыты при $T_w = 1250\text{ K}$. По трубке в течение 30 мин продувался аргон с массовой скоростью $\rho_f w_f = 20\text{ кг/м}^2\text{с}$. Уноса массы отложений не было обнаружено. Таким образом, удаление отложений в исследуемых условиях осуществляется только посредством химической эрозии.

При горении коксоотложений в кислороде образуются H_2O , CO и CO_2 . В работе [10] дан обзор экспериментальных работ по механизму химического взаимодействия углерода с газами. Двуокись углерода, согласно [10], образуется в основном при $T_w < 900\text{ K}$, а окись углерода - при гораздо более высоких температурах. Согласно данным [4, 5, 11, 12], CO образуется в интервале температур 1500-2100 K. В имевшихся условиях экспериментально определить содержание CO в продуктах реакции затруднительно из-за ее дальнейшего окисления в газовой фазе, и поэтому на выходе из установки определялось содержание CO_2 . Будем считать, что в условиях опытов идет гетерогенная брутто-реакция горения коксоотложений с образованием CO_2 :



где a - число атомов водорода, зависящее от температуры и материала стенки, состава топлива и других факторов; Q - теплота сгорания, $Q = -393,5 - 132a$ [кДж/моль].

Для определения интенсивности выгорания коксоотложений в диффузионном режиме, которому соответствует наибольшая скорость удаления отложений, при известных параметрах основного потока удобно вос-

пользоваться методом интегральных соотношений [9]

$$\frac{d\text{Re}_\delta^{**}}{d\bar{x}} + \text{Re}_\delta^{**} \left(\frac{1}{\Delta \bar{k}_i} \frac{d(\Delta \bar{k}_i)}{d\bar{x}} + \frac{1}{R} \frac{dR}{d\bar{x}} \right) = \text{St}_\delta (1 + \epsilon_{i\delta}) \text{Re}_L \quad (2)$$

Здесь $\text{Re}_\delta^{**} = \rho_f w_f \delta_\delta^{**} / \mu_{f0}$ - число Рейнольдса, построенное по толщине потери массы i -элемента;

$$\delta_\delta^{**} = \int_0^\infty \frac{\rho w}{\rho_f w_f} \frac{\bar{k}_i - (\bar{k}_i)_f}{(\bar{k}_i)_w - (\bar{k}_i)_f} dy; \quad \bar{x} = x/L;$$

$$\Delta \bar{k}_i = (\bar{k}_i)_w - (\bar{k}_i)_f; \quad \text{Re}_L = \rho_f w_f L / \mu_{f0};$$

$\epsilon_{i\delta}$ - диффузионный параметр проницаемости стенки;

$$\text{St}_\delta = \frac{\left(-\rho D_{12} \frac{d\bar{k}_i}{dy} \right)_w}{\rho_f w_f \Delta \bar{k}_i} \quad \text{- диффузионное число}$$

Стентона; \bar{k}_i - весовая концентрация; i - компонент в газовой смеси.

Для определения числа St_δ воспользуемся предельными относительными законами тепло- и массообмена С. С. Кутателадзе - А. И. Леонтьева [13]

$$\Psi = \text{St} / \text{St}_0 = f(h_w / h_f, \epsilon_1),$$

где Ψ - относительный закон тепло- и массообмена, учитывающий влияние таких факторов, как неизотермичность и проницаемость стенки; St_0 - число Стентона в стандартных условиях обтекания непроницаемой поверхности потоком несжимаемого газа с постоянными физическими свойствами. В работах [14, 15] рекомендуется вычислять St_0 через Re^{**} , определенное по динамической вязкости при температуре стенки:

$$\text{St}_0 = A \text{Re}_\delta^{**m} \text{Sc}^{-0,75} (\mu_w / \mu_f)^m,$$

где $A = 0,0128$, $m = 0,25$ при $\text{Re}_\delta^{**} < 10^4$;

$A = 0,0074, m = 0,182$
 при $10^4 < Re_{\partial}^{**} < 4 \times 10^5$.

Параметр проницаемости

$$\epsilon_{1\partial} = \dot{Y}_w / (\rho_f w_f St)_w,$$

согласно [9], может быть определен через концентрацию кислорода при условии, что стенка для кислорода непроницаема:

$$\epsilon_{1\partial} = (\bar{k}_{O_2})_f / (\bar{k}_{O_2})_w - 1.$$

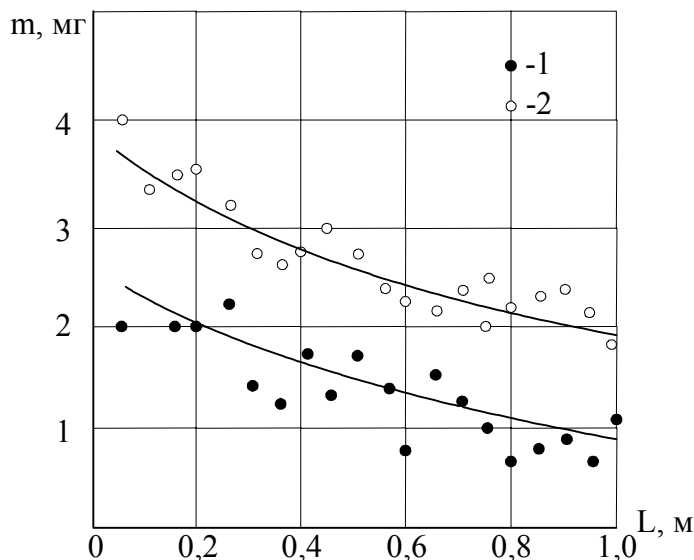
Для диффузионного режима горения коксоотложений из брутто-реакции (1) имеем

$$(\bar{k}_{O_2})_w = \frac{32 + 8a}{44 + 9a} (\bar{k}_{npod})_w$$

$$\text{и } \epsilon_{1\partial} = \frac{12 + a}{32 + 8a} (\bar{k}_{O_2})_f.$$

Видно, что параметр проницаемости стенки определяется не только концентрацией кислорода в основном потоке, как в [9], но и составом коксоотложений. При дозвуковом течении газа и температурном факторе $\Theta = T_w / T_f > 1$, относительный предельный закон тепло- и массообмена имеет вид [13]

$$\Psi = \frac{4}{\epsilon_1(\Theta - 1)} \left[\arctg \sqrt{\frac{\epsilon_{1\partial}}{(\Theta - 1)(1 - \epsilon_{1\partial})}} - \arctg \sqrt{\frac{\epsilon_{1\partial}\Theta}{\Theta - 1}} \right]^2.$$



Число Рейнольдса Re_{∂}^{**} находится интегрированием уравнения диффузии пограничного слоя совместно с законом массообмена

$$Re_{\partial}^{**} = \left[\frac{A(m+1)}{Sc^{0,75}} Re_x \int_0^{\bar{x}} \Psi(1 + \epsilon_{1\partial}) \left(\frac{\mu_w}{\mu_f} \right)^m d\bar{x} \right]^{\frac{1}{m+1}}.$$

Цилиндрический канал с коксоотложениями в опытах был выбран с небольшой относительной длиной (4-12 калибров), поэтому параметры газа в ядре потока можно считать постоянными по длине. В каждом опыте $b_{1\partial} = const$ и $\psi = const$.

Тогда скорость выжигания коксоотложений в потоке кислорода определяется следующей формулой:

$$\dot{Y}_{CH_a} = 0,0029 \frac{12 + a}{3 + 8a} (\bar{k}_{O_2})_f c_f w_f Re_x^{0,2} Sc^{-0,6} \Psi^{0,8} \times (1 + \epsilon_{1\partial})^{-0,2} (\mu_w / \mu_f)^{0,2}. \quad (3)$$

Сопоставление результатов расчетов скорости выжигания коксоотложений в потоках кислорода и смесей кислорода с азотом при $(K_{O_2})_f = 0,61, 0,82$ и $0,99$ с экспериментальными данными, приведенное на рис. 1, показывает их удовлетворительное соответствие.

Рис. 1. Выжигание кока из трубопровода в потоке кислорода

$$T_w = 1170K;$$

$$1 - G_o = 35 \text{ мл/мин}; \tau = 90 \text{ мин};$$

$$2 - G_o = 74 \text{ мл/мин}; \tau = 60 \text{ мин}.$$

Сплошные линии - расчет по формуле (3)

Список литературы

1. Козлов Ю. С., Кузнецов О. К., Тельнов А. Ф. Очистка изделий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1982. 321 с.
2. Яворский И. А. Физико-химические основы горения ископаемых топлив и графитов. Новосибирск: Наука, 1973. 350 с.
3. Федоров Е. П., Иванов В. Ф., Яновский Л. С., Сафина Л. Р. Комплексный метод исследования отложений, образующихся при термохимических превращениях авиаГСМ / / Сб. Тез.докл. VII Всесоюзной научно-технической конференции "Эксплуатационные свойства авиационных топлив, смазочных материалов и спецжидкостей". Киев: КИИГА, 1989. С. 35-36.
4. Барлетт. Систематический метод определения абляции в химически активной окружающей среде // Вопросы ракетной техники, 1963. № 3. С. 3-13.
5. Барлетт. Эффективная теплота абляции графита // Вопросы ракетной техники, 1964. № 1. С. 213-221.
6. Дей, Уокер, Райт. Реакции углерода с кислородом при высоких температурах и больших скоростях газового потока / В кн.: Реакции углерода с газами. М.: ИЛ. 1963. С. 257-299.
7. Рознер, Аллендорф. Кинетика окисления графита диссоциированным кислородом при высоких температурах // РТК, 1965. № 8. С. 204-206.
8. Скала, Джильберт. Сублимация графита при гиперзвуковых скоростях // РТК, 1965. № 9. С. 87-100.
9. Волчков Э. П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 239 с.
10. Уокер, Русинке, Остин. Реакции углерода с газами. - Сб. переводов / Под ред. Е. С. Головиной. М.: ИЛ. 1963. С. 9-12.
11. Леторт. Механизм горения углерода. / В кн.: Реакции углерода с газами. М.: ИЛ. 1963. С. 126-168.
12. Споддинг Д. Б. Основы теории горения. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 319 с.
13. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 344 с.
14. Кутателадзе С. С., Миронов Б. П. Относительное влияние температурного фактора на турбулентный пограничный слой при конечных числах Рейнольдса // ПМТФ, 1973. № 3. С. 61-65.
15. Леонтьев А. И., Миронов Б. П. Распространение предельных относительных законов трения и теплообмена на неизотермическое течение газа с конечными числами Рейнольдса // ПМТФ. 1965. № 5. С. 162-166.

DEFINITION OF SPEED OF REMOVING CARBON BUILDING IN THE CHANNELS OF FUEL SYSTEMS GTE BY THE METHOD OF BURNING OUT IN AIR FLOW

© 2002 A. A. Kharin, L. S. Yanovsky

Russian State University of Innovation Technology and Business

The results of an experimental research of speed of burning out carbon building are given. They formed on internal walls at thermochemistry transformations fuel in an air flow. The technique of an estimation of speed of removal carbon building from channels of fuel systems GTE is offered.