

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ УНОСА
ГРАФИТА В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННОЙ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ**

*А. И. Леонтьев, Э. П. Волчков, Е. Г. Зауличный,
Е. И. Синайко
(Новосибирск)*

Проблеме турбулентного пограничного слоя при наличии поперечного потока вещества и неизотермичности посвящено большое количество работ, в основном теоретического характера. Методы расчета трения и теплообмена в большинстве этих работ основаны на полуэмпирических теориях турбулентности Прандтля и Кармана [1—3]. Задача обтекания уносимой поверхности (горения, сублимации, испарения и т. д.) сводится к проблеме обтекания полупроницаемой поверхности [2—6].

Все аналитические методы расчета турбулентного пограничного слоя в рассматриваемых условиях являются приближенными, основаны на ряде спорных допущений и нуждаются в экспериментальной проверке. Количество экспериментальных работ по выгоранию графитовых поверхностей в турбулентном пограничном слое весьма ограничено [7].

Данная работа посвящена экспериментальному определению выгорания графитовой поверхности в условиях существенной неизотермичности. Результаты эксперимента сравниваются с методом расчета уноса, основанного на применении предельных относительных законов трения и теплообмена [5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Эксперименты проводились на графитовом канале. Схема установки представлена на рис. 1.

Установка представляет собой герметически закрытую камеру, в которой помещался исследуемый образец цилиндрической формы 12. Длина образца 170—175 мм, внутренний диаметр 36 ÷ 38 мм, толщина стенки 10—12 мм. Графитовый канал обдувался воздухом при комнатной температуре. Воздух поступал из воздуховода по трубе 4 через диффузор 7 и сопло 9 в канал исследуемого образца. Отработанный газ по каналу 16 выбрасывался в атмосферу. Выполненный из графита с удельным весом 1670—1690 кг/м³ образец нагревался индуктором 11 высокочастотной установки мощностью 100 кВт и рабочей частотой 75 кГц до температуры 1700 ÷ 2100° К.

Температура внешней стенки образца замерялась оптическим пирометром 14 через кварцевое стекло 13. Погрешность замера температуры составляла ±1,5%.

Специальным экспериментом оценивался перепад температур по толщине стенки образца. Он не превышал $3 \div 7\%$ от замеренной температуры внешней поверхности образца. Кроме того, вводилась температурная поправка на нечерноту излучения графита по паспортным данным пирометра, которая составляла $30-45^\circ\text{C}$ для рабочих температур образца.

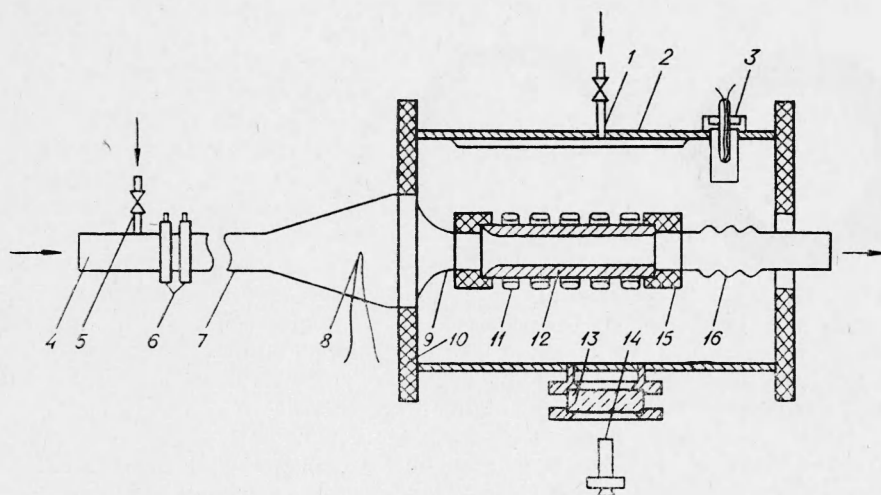
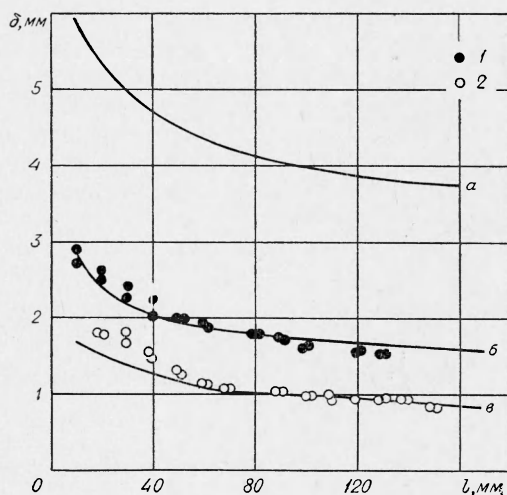


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Температура стенки образца измерялась по длине образца и регистрировалась самопишущим миллиамперметром системы VAREG. На участке образца от 35 до 150 мм колебания температур не превышали $\pm 2,5\%$. Равномерное поле скоростей на входе в канал создавалось профилированным соплом 9. Расход воздуха замерялся по перепаду давлений на шайбе 6 и колебался от 3,65 до 258,5 г/сек, при этом скорость воздуха в рабочем канале менялась от 3,5 до 300 м/сек. Температура воздуха контролировалась нихром-константановой термопарой 8. Длительность эксперимента в зависимости от расхода воздуха менялась от 1 до 20 мин. Унос поверхности графита составлял $1 \div 3$ мм на сторону (рис. 2).

Внутренний диаметр графитового образца до и после опыта замерялся компаратором системы АББЕ с ценой деления 1 микрон. Перед экспериментом рабочая камера 2 (см. рис. 1) продувалась инертным газом из трубки 1 с целью избежать уноса с внешней поверхности образца за счет свободной конвекции.

Рис. 2. Унос графита по длине канала. 1 — эксперимент $\gamma_0 \omega_0 = 362 \text{ кг/м}^2\text{сек}$, $\tau = 63 \text{ сек}$; 2 — эксперимент $\gamma_0 \omega_0 = 67,2 \text{ кг/м}^2\text{сек}$, $\tau = 144 \text{ сек}$. а — унос, рассчитанный по формуле (10); б, в — унос, рассчитанный по формуле (7).



Испытуемый образец разогревался до рабочей температуры в течение 1—2 мин. Чтобы избежать уноса графита во время разогрева образца, по трубке 5 в канал подавался аргон (содержание O_2 составляло 0,001—0,003%).

После разогрева образца подача инертного газа по каналу прекращалась и в течение нескольких секунд устанавливался необходимый расход воздуха. По окончании эксперимента подача воздуха прекращалась, по каналу пропусклся инертный газ до полного остывания образца.

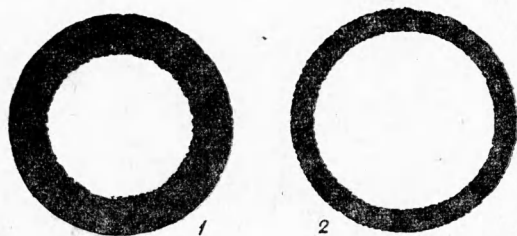


Рис. 3. Сопоставление сечений графитового образца до (1) и после (2) эксперимента.

Графитовый канал после продувки разрезался на цилиндрические секции высотой 10 или 20 мм. Унос графита измерялся по 4—6 диаметрам на компараторе на входе и выходе для каждой секции.

На рис. 3 представлены две секции одного из экспериментов до и после испытания. Во всех экспериментах наблюдалась хорошая равномерность эрозии по периметру канала.

Было проведено семь зачетных экспериментов. Один из них был проведен на чистом аргоне при температуре поверхности образца $2100^\circ K$. Аргон продувался по каналу с внутренним диаметром 15 мм, расход его составлял 15 г/сек, скорость при этом была равна 50 м/сек.

После продувки в течение 10 мин уноса графита не наблюдалось. Таким образом, можно полагать, что унос графита обуславливается химической эрозией. Величина параметра проницаемости стенки (окислительного потенциала) для всех экспериментов была постоянной и равной $b_1 = 0,173$. Параметр неизотермичности, вычисленный по теплоемкостям газов на стенке и основного потока ψ_1 , изменялся от 6,5 до 9,3.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С МЕТОДОМ РАСЧЕТА

Графитовый образец был выбран с небольшой относительной длиной (4,5 ÷ 5 калибров), поэтому при обобщении опытных данных можно не учитывать изменение параметров газа в ядре по длине канала.

В рабочем диапазоне температур стенки режим горения можно считать диффузионным с преимущественным образованием CO [7]. Принимая аналогию процессов передачи тепла и массы ($Le = Sc = Pr = 1$), приходим к подобию распределения приведенных концентраций и полных энтальпий [8, 6]

$$\frac{h - h_{ст}}{h_0 - h_{ст}} = \frac{\tilde{K}_i - (\tilde{K}_i)_{ст}}{(\tilde{K}_i)_0 - (\tilde{K}_i)_{ст}} \quad (1)$$

Из уравнения массового потока кислорода к стенке

$$(\tilde{K}_0)_{ст} \rho_{ст} w_{ст} - \rho D \left(\frac{\partial \tilde{K}_0}{\partial y} \right)_{ст} = 0$$

с учетом уравнения (1) получаем

$$b_1 = \frac{j_{cr}}{\gamma_0 \omega_0 St_h} = Le \frac{(\tilde{K}_0)_0 - (\tilde{K}_0)_{cr}}{(\tilde{K}_0)_{cr}}. \quad (2)$$

Из уравнения массового потока уносимого материала стенки

$$\rho_{cr} \omega_{cr} = -\rho D \left(\frac{\partial \tilde{K}_c}{\partial y} \right)_{cr} + \rho_{cr} \omega_{cr} (\tilde{K}_c)_{cr}$$

с учетом (1) находим

$$b_1 = Le \frac{(\tilde{K}_c)_{cr}}{1 - (\tilde{K}_c)_{cr}}. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (2) и (3) для диффузионного режима горения, имеем:

$$b_1 = \frac{3}{4} Le (\tilde{K}_0)_0.$$

Таким образом, «окислительный потенциал» b_1 зависит от приведенной концентрации окислителя в основном потоке. Для воздуха $b_1 = 0,173$. Следовательно, для определения критерия Стентона

$$St_h = \frac{\bar{j}_{cr}}{j_0 \omega_0 b_1}$$

необходимо из эксперимента получить массовый поперечный поток вещества на стенке, т. е. массовую скорость выгорания графита.

Для случая $h_{cr} = \text{const}$, $\gamma_0 \omega_0 = \text{const}$ интегральное уравнение энергии имеет вид:

$$\frac{d Re_h^{**}}{dx} = Re_L St_0 (\Psi_h + b_h), \quad (4)$$

где предельный относительный закон теплообмена для $\psi_1 > 1$ для вдува однородного газа

$$\Psi_h = \frac{4}{b_1(\psi_1 - 1)} \left[\text{arctg} \sqrt{\frac{b_1}{(\psi_1 - 1)(1 + b_1)}} - \text{arctg} \sqrt{\frac{b_1 \psi_1}{\psi_1 - 1}} \right]^2 \quad (5)$$

и закон теплообмена

$$St_0 = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}}, \quad (6)$$

где

$$Re_h^{**} = \frac{\rho_0 \omega_0 \delta_h^{**}}{\mu_{cr}}$$

Решая уравнение (4) с учетом (5) и (6), находим:

$$St_h = 0,029 Re_x^{-0,2} Pr^{-0,6} \Psi_h^{0,8} (1 + b_1)^{-0,2} \left(\frac{\mu_{ст}}{\mu_0} \right)^{0,2}$$

или

$$K = \frac{St_h Pr^{0,6} (1 + b_1)^{0,2}}{\Psi_h^{0,8} \left(\frac{\mu_{ст}}{\mu_0} \right)^{0,2}} = 0,029 Re_x^{-0,2}. \quad (7)$$

Так как величина «разгара» канала за время эксперимента составляла всего 15 ÷ 25%, то изменение $\gamma_0 \omega_0$ по времени с достаточной степенью точности можно считать линейным.

Тогда

$$\bar{j}_{ст} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} j_{ст} d\tau, \quad (8)$$

где $j_{ст}$ — мгновенная массовая скорость уноса графита (см. уравнение (2)).

Проинтегрировав уравнение (8), имеем

$$\bar{j}_{ст} = \frac{\delta \tau}{\gamma_c} = b_1 \overline{\gamma_0 \omega_0} St_h,$$

где

$$\overline{\gamma_0 \omega_0} = \frac{(\gamma_0 \omega_0)_H \left\{ 1 + \left[\frac{(\gamma_0 \omega_0)_k}{(\gamma_0 \omega_0)_H} \right]^{0,8} \right\}}{2}.$$

Опытные данные, обобщенные по формуле (7) в виде зависимости критерия Стентона от критерия Рейнольдса, построенного по длине канала, приведены на рис. 4.

Наблюдается достаточно хорошее совпадение эксперимента с методом расчета (с точностью $\pm 13\%$). Как следует из работы [5], влияние поперечного потока вещества на закон теплообмена для описываемых экспериментов незначительно. При совместном влиянии неизотермичности и

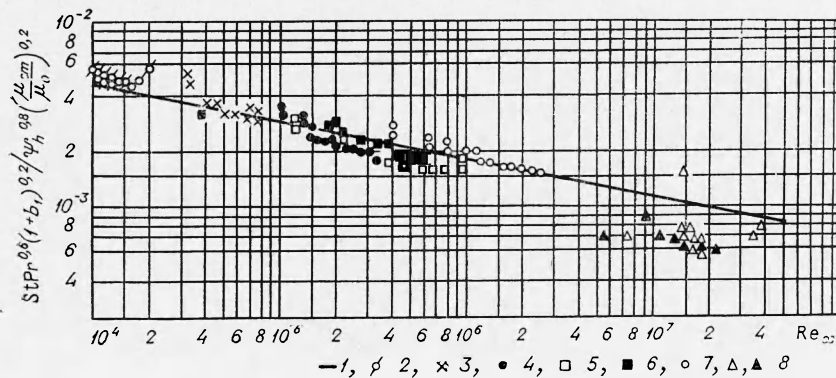


Рис. 4. Сопоставление теории с экспериментом.

1 — расчет по формуле (7); 2 — $\gamma_0 \omega_0 = 3,59 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$, $\tau = 1271 \text{ сек}$; 3 — $\gamma_0 \omega_0 = 10,5 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$, $\tau = 509 \text{ сек}$; 4 — $\gamma_0 \omega_0 = 36,6 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$, $\tau = 420 \text{ сек}$; 5 — $\gamma_0 \omega_0 = 198,5 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$, $\tau = 73 \text{ сек}$; 6 — $\gamma_0 \omega_0 = 67,2 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$, $\tau = 144 \text{ сек}$; 7 — $\gamma_0 \omega_0 = 362,0 \text{ кг/м}^2 \text{сек}$, $\tau = 63 \text{ сек}$; 8 — опыты Денисона и Бартлетта [7].

поперечного потока вещества закон теплообмена можно представить в виде:

$$\left(\frac{St_h}{St_0}\right)_{Re_h^{**}} = \Psi_h = \Psi_1 \cdot \Psi_b,$$

где

$$\Psi_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{\psi_1 + 1}}\right)^2, \tag{9}$$

$$\Psi_b = \left(1 - \frac{b_h}{b_{кр}}\right)^2.$$

На долю поперечного потока вещества приходится лишь 12% от общего влияния на критерий Стентона, тогда как неизотермичность уменьшает последний более чем в три раза.

На рис. 2 кривая 1 определяет линейный унос по формуле

$$St_0 = 0,029 Re_x^{-0,2} Pr^{-0,6} \tag{10}$$

без учета поперечного потока вещества и неизотермичности для одного из экспериментов.

Коэффициент динамической вязкости для уравнения (10) найден по температуре основного потока T_0 .

Как видно из рис. 2, разница в оценке уноса (критерия Стентона) для указанного эксперимента ($\psi_1=9,2$) с учетом и без учета неизотермичности и поперечного потока вещества достигает 2,5 раза.

На рис. 5 приводится график по влиянию существенной неизотермичности на закон теплообмена в турбулентном пограничном слое по результатам наших экспериментов. Из сопоставления видно, что закон теплообмена в виде (9) хорошо подтверждается опытными данными в области изменения энтальпийного фактора ψ_1 от 6,5 до 9,3.

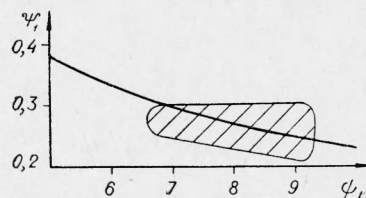


Рис. 5. Сопоставление предельного закона теплообмена с экспериментом (заштрихованная область — эксперименты авторов).

ВЫВОДЫ

1. Проведенные опыты показывают, что в диапазоне изменений энтальпийного фактора от 6,5 до 9,3 и критерия Re_x от 10^4 до $6 \cdot 10^6$ в удовлетворительном соответствии с опытом находится предельная формула

$$\left(\frac{St_h}{St_0}\right)_{Re_h^{**}} = \Psi_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{\psi_1 + 1}}\right)^2,$$

где

$$St_0 = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}},$$

а

$$Re_h^{**} = \frac{\rho_0 w_0 \delta_h^{**}}{\mu_{ст}}.$$

2. Основным механизмом уноса графита в охваченной области температур является химическая эрозия, интенсивность которой зависит от «окислительного потенциала» b_1 основного потока.

*Поступила в редакцию
3/II 1967*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Лапин. ЖТФ, 1960, XXX, 8.
2. М. Р. Денисон. Сб. «Вопросы ракетной техники», № 1, 1962.
3. В. П. Мотулевич. Докт. дисс., М., 1962.
4. С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. ПМТФ, 1964, 6.
5. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск, 1964.
6. Е. Г. Зауличный, С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. ПМТФ.
7. Е. Бартлетт, М. Р. Денисон. Теплопередача, 1961, серия С, 4.
8. Л. Лиз. Сб. «Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций». ИЛ, 1962.
9. А. И. Леонтьев, Б. П. Миронов. ПМТФ, 1965, 5.
10. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Физматгиз, 1963.