

4. Б. Я. Любков. Кинетическая теория фазовых превращений. М., «Металлургия», 1969.
5. Р. Ф. Стрикленд-Констэбл. Кинетика и механизм кристаллизации. Л., «Недра», 1971.
6. K. A. Jackson. Progress in solid state chemistry. Vol. 4, Pergamon Press, 1967.
7. E. R. Buckle. Proc. Roy. Soc., 1961, A261, 189.
8. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М., Изд-во АН СССР, 1962.

УДК 662.612.3

ВЫГОРАНИЕ ГРАФИТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВДУВЕ ЧЕРЕЗ НЕЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА

Э. П. Волчков, П. В. Никитин

(Новосибирск)

Защита обтекаемых поверхностей от воздействия химически агрессивных газовых потоков представляет большой практический интерес для современной техники. С этой целью может использоваться вдув в пограничный слой инертного газа, который затрудняет диффузию окислителя из основного потока к стенке, что приводит к снижению интенсивности химической эрозии. В работе [1] исследовалась эффективность тангенциального вдува.

В настоящей работе излагается метод расчета и результаты экспериментального исследования турбулентного пограничного слоя на выгорающей пористой поверхности при постоянном вдуве по длине инертного газа. Аналогичные процессы имеют место, когда материал обтекаемой поверхности разлагается от термического воздействия газового потока. Образующиеся при этом газообразные компоненты вдуваются в пограничный слой, а твердый коксовый остаток уносится за счет химической эрозии. Обычно в таких задачах наибольший практический интерес представляет определение скорости разрушения поверхности, коэффициентов теплообмена и трения, концентрации компонент газовой смеси вблизи стенки.

Анализ тепломассообмена на реагирующей проницаемой поверхности. Рассмотрим турбулентный пограничный слой, развивающийся на пористой реагирующей поверхности при вдуве через нее инертного газа.

Интегральное соотношение диффузии i -го химического элемента для эффективной бинарной смеси имеет вид [1]

$$\frac{d\text{Re}_i^{**}}{dX} + \frac{\text{Re}_i^{**}}{\Delta K_i} \frac{d\Delta K_i}{dX} - \frac{j_w}{\rho_0 w_0} \text{Re}_L = \text{St Re}_L. \quad (1)$$

Здесь

$$\text{St} = - \frac{\rho D (\partial K_i / \partial y)_w}{\rho_0 w_0 \Delta K_i} \quad (2)$$

— диффузионное число Стантона; $j_w = j_r + j_c$ — суммарный поперечный поток подводимого через стенку газа и продуктов химической реакции; Re_i^{**} и Re_L — числа Рейнольдса, записанные соответственно по толщине потери массы δ_i^{**} и характерному линейному размеру L ; $X = x/L$; $\Delta K_i = K(i)_w - K(i)_0$, где $K(i)$ — обобщенная концентрация i -го химического элемента, определяемая содержанием этого элемента в свободном состоянии и его долей в химическом соединении.

Используя уравнение диффузии i -го элемента на стенке

$$j(i)_w = j_w K(i)_w - \rho D (\partial K_i / \partial y)_w,$$

выражение для диффузионного числа Стантона (2) можно привести к виду

$$St = \frac{j(i)_w - j_w K(i)_w}{\rho_0 \omega_0 \Delta K_i} \quad (3)$$

Подставляя зависимость (3) в уравнение (1) и интегрируя его по длине, получим выражение для диффузионного числа Рейнольдса

$$Re_i^{**} = \frac{\int_0^x [j(i)_w - j_w K(i)_0] dx}{\mu_0 [K(i)_w - K(i)_0]} \quad (4)$$

При постоянном вдуве по длине реагирующей поверхности $(j(r))_w = \text{const}$ из соотношения (4) следует

$$Re_r^{**} = \frac{j(r)_w x}{\mu_0 K(r)_w} \quad (5)$$

Зависимость (5) может быть записана через параметры проницаемости на стенке b_1^r и b_1^z , где

$$b_1^r = \frac{j(r)_w}{\rho_0 \omega_0 St}, \quad b_1^z = \frac{j_w}{\rho_0 \omega_0 St} = b_1^r + b_1^c \quad (6)$$

Как показано в работе [2], в диффузионной области реагирования углерода с кислородом, когда идет реакция $C + O \rightarrow CO$, параметр проницаемости $b_1^c = 3/4 K(O)_0 = \text{const}$, т. е. определяется только окислительным потенциалом основного потока и не зависит от величины вдува инертного газа через реагирующую поверхность.

Воспользуемся соотношением, приведенным в работе [2], которое устанавливает связь между концентрацией газа на стенке и параметрами проницаемости

$$K(r)_w = b_1^r / (1 + b_1^z) \quad (7)$$

Тогда выражение (5) приводится к виду

$$Re_r^{**} = \frac{(1 + b_1^z) j(r)_w Re_x^{**}}{b_1^r \rho_0 \omega_0} = (1 + b_1^z) St Re_x \quad (8)$$

Полученная зависимость (8) используется при определении диффузионного числа St . При этом закон массообмена по аналогии с законом теплообмена [3] принимается в форме

$$St = \Psi St_0 = A Re^{** - m} Sc^{-n} (\mu_w / \mu_0)^m \Psi \quad (9)$$

Для турбулентного пограничного слоя в диапазоне изменения $Re^{**} < 10^4$ можно принять $A = 0,0128$; $m = 0,25$; $n = 0,75$. Согласно [3], для дозвуковых скоростей течения газа относительную функцию тепломассообмена Ψ при $Re^{**} = \text{idem}$ можно представить в виде

$$\Psi = \Psi_T \Psi_s = \left(\frac{2}{\sqrt{\psi_1 + 1}} \right)^2 \left(1 - \frac{b^z}{b_{кр}} \right)^2 \quad (10)$$

Здесь Ψ_T и Ψ_s — относительные функции, учитывающие влияние неизотермичности потока и проницаемости поверхности;

$$\psi_1 = h_w / h_0 = \left[\sum^n h(i)_w K(i)_w \right] / h_0 \quad (11)$$

— энтальпийный фактор неизотермичности. Значение критического параметра проницаемости с учетом конечности числа Re^{**} [3] для $\psi_1 > 1$ находится по формуле

$$b_{кр} = \frac{1}{\psi_1 - 1} \left(\arccos \frac{2 - \psi_1}{\psi_1} \right)^2 \left(1 + \frac{0,83}{Re^{**0,14}} \right) \quad (12)$$

Решая уравнения (8) и (9) совместно с уравнением (10), можно получить расчетную зависимость для диффузионного числа Стантона при постоянном вдуве инертного газа на выгорающей поверхности

$$St = 0,0306 Re_x^{-0,2} Sc^{-0,6} \Psi^{0,8} (1 + b_1^{\Sigma})^{-0,2} (\mu_w/\mu_0)^{0,2}. \quad (13)$$

Интенсивность химической эрозии поверхности может быть определена из соотношения

$$j(C)_w = \rho_0 w_0 b_1^c St = \frac{0,0306 \rho_0 w_0 b_1^c \Psi^{0,8} (\mu_w/\mu_0)^{0,2}}{Re_x^{0,2} Sc^{0,6} (1 + b_1^{\Sigma})^{0,2}}. \quad (14)$$

Расчет выгорания поверхности ведется методом последовательных приближений. В первом приближении диффузионное число Стантона St определяется без учета вдува инертного газа ($K(r)_w = 0$, $b_1^r = 0$, $b_1^{\Sigma} = b_1^c$) по формуле (13). После этого по известному потоку инертного газа через поверхность вычисляются параметры проницаемости b_1^r , b_1^{Σ} (6) и концентрация газа на стенке (7). Фактор неизотермичности Ψ определяется по формуле (11) с учетом концентраций газовых компонент на стенке. По формуле (10) рассчитывается функция тепломассообмена Ψ . В последующих приближениях число St вычисляется по формуле (13) уже с учетом вдува инертного газа.

Аналогичным способом можно вести расчет от области критических вдувов, полагая в первом приближении $K(r)_w = 1$.

Следует отметить, что проведенный анализ выгорания графитовой поверхности может быть распространен и на другие случаи химического взаимодействия поверхности с потоком газа. При этом в соответствии с протекающими реакциями изменяются только значения параметра проницаемости и концентраций компонент у стенки.

Экспериментальное исследование выгорания пористой поверхности при вдуве через нее инертного газа в турбулентный пограничный слой. Опыты проводились на стенде с индукционным нагревом графитового канала, описание которого приведено в работе [4], схема рабочего участка показана на рис. 1. Экспериментальный цилиндрический канал 1 был выполнен из пористого графита ($\rho_c \approx 1030 \text{ кг/м}^3$) с пористостью $\sim 50\%$, внутренний диаметр рабочего участка 36 мм, длина пористой части $90 \div 165$ мм, ($x/d \leq 4,5$), толщина стенки 8 мм. Внутри герметичной камеры опытный канал с помощью резьбового соединения стыковался на входе с соплом 2, на выходе — с выхлопным патрубком. Для обеспечения большей плотности резьбовых соединений и для того, чтобы иметь фиксированную длину пористой части, начало и конец рабочего участка выполнялись из плотного графита ($\rho_c \approx 1950 \text{ кг/м}^3$), который запрессовывался в пористый. Стенка канала разогревалась до температур $T_w = 1900 \div 2000^\circ \text{К}$ с помощью индуктора 3 высокочастотной установки мощностью 100 кВт и рабочей частотой около 75 кГц.

В качестве основного потока использовался воздух с $T_{01} \approx 290^\circ \text{К}$, который подавался в опытный участок через профилированное сопло с расходом $\sim 110 \text{ г/с}$, чему соответствовало число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру $Re_d \approx 2,18 \cdot 10^5$.

Вдуваемый инертный газ (аргон, азот или гелий) подавался в герметичную камеру ($p \leq 5$ ати), внутри которой помещался пористый образец. Расход газа измерялся с помощью ротаметров. Проходя через разогретый пористый графит, он нагревался до температуры стенки. Поперечный

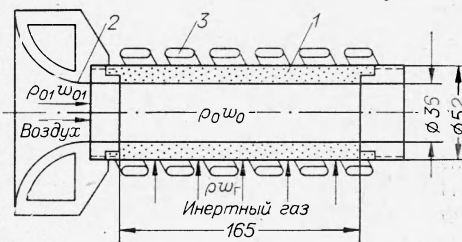


Рис. 1. Схема рабочего участка.

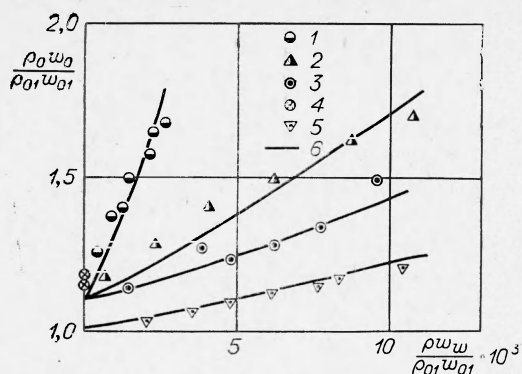


Рис. 2. Изменение скорости воздушного потока в конце пористого участка при вдуве газов.
1 — гелий ($10 < \psi_1 < 33$); 2 — азот ($\psi_1 \approx 7,5$); 3 — аргон ($3,5 < \psi_1 < 6,1$); 4 — $j_r = 0$ ($\psi_1 \approx 7,5$); 5 — воздух ($\psi_1 = 1$); 6 — расчет по формуле работы [5].

выгорание графитовой поверхности δ не превышало 1,5 мм на сторону. Локальная интенсивность выгорания определялась по изменению внутреннего диаметра до и после опыта. Измерения проводились на компараторе с ценой деления 1 мк.

При обработке опытных данных использовались местные значения скорости w_δ на внешней границе пограничного слоя. Измерения скорости течения газа в ядре потока проводились с помощью охлаждаемого комбинированного насадка Прандтля. Насадок перемещался координатником по оси опытного участка. На рис. 2 приводятся результаты измерения скорости в конце пористого участка в зависимости от интенсивности вдува газа в изотермических и неизотермических условиях. Кривые рассчитаны по зависимости, полученной в работе [5],

$$\rho_0 w_0 / \rho_{01} w_{01} = 1 + 4(x/d) \rho w_w / \rho_{01} w_{01} + 4HRe^{**} / Re_d$$

и формуле (5). Данные, приведенные на этом рисунке, показывают, что неизотермичность при $\psi_1 > 1$ приводит к некоторому увеличению скорости в ядре потока. Так, в области интенсивных вдувов для азота ($j(N)_w = 0,485 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ при $\psi_1 \approx 7,5$) скорость в ядре потока увеличилась на 33% по сравнению с вдувом воздуха, но при $\psi_1 = 1$. Скорость в ядре потока растет быстрее при вдуве газа с меньшим молекулярным весом.

Опыты, проведенные на пористой графитовой поверхности при отсутствии вдува инертного газа ($j(r)_w = j_r = 0$; $\psi_1 \approx 7,5$; $\rho_{01} w_{01} = 70 \div 107 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$), подтвердили результаты работы [4] по исследованию тепломассообмена на выгорающей поверхности. Основным механизмом уноса графита в данной области исследования является химическая эрозия, интенсивность которой определяется окислительным потенциалом b_i^* основного потока. При выгорании в потоке воздуха $\dot{b}_i^* = 0,173$.

На следующем этапе исследования изучалось выгорание стенки канала по его длине при различных массовых потоках аргона, азота и гелия через стенку. Экспериментальное значение интенсивности выгорания

поток вдуваемого газа на стенке $j(r)_w$ определялся по отношению к внутренней поверхности пористой части образца. Диапазон изменения относительного вдува $j(r)_w / \rho_{01} w_{01}$ в опытах составлял: для аргона $9,1 \cdot 10^{-4} \div 9,8 \cdot 10^{-3}$, для азота $6,1 \cdot 10^{-4} \div 6,3 \cdot 10^{-3}$, для гелия $1,54 \cdot 10^{-4} \div 2,23 \cdot 10^{-3}$. Чтобы исключить возможное выгорание поверхности образца во время разогрева, по окончании опыта в канал подавался аргон. Длительность эксперимента в зависимости от скорости выгорания изменялась в пределах $\tau = 40 \div 300 \text{ с}$. За время опыта

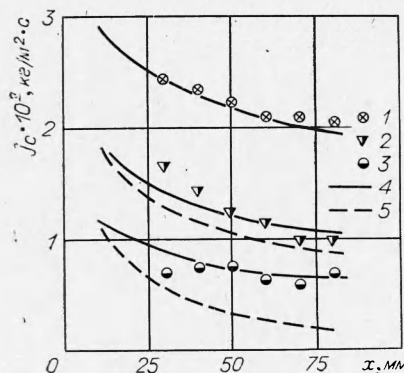


Рис. 3. Выгорание стенки по длине канала при:
1 — $j_r = 0$, $\psi_1 = 7,5$; 2 — $j(\text{He})_w = 0,04 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, $\psi_1 = 17,3$; 3 — $j(\text{Ar})_w = 0,545 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, $\psi_1 = 3,5$; 4 — расчет по формуле (14); 5 — расчет при $\rho_0 w_0 = \rho_{01} w_{01}$.

поверхности определялось по формуле

$$j(C)_w = j_c = \delta \rho_c / \tau.$$

Погрешность косвенных измерений интенсивности выгорания j_c составляла порядка 9% в области вдувов до $b^r/b_{кр} \sim 0,6$ и достигала $16 \div 25\%$ при $b^r \rightarrow b_{кр}$. На рис. 3 приводится интенсивность выгорания по длине канала. Опытные данные сопоставляются с расчетами по формуле (14). Сплошные линии построены по местным значениям скорости на внешней границе пограничного слоя, а штриховые — без учета ускорения

потока по параметрам потока на входе в опытный участок ($\rho_0 \omega_0 = \rho_{01} \omega_{01} = 107 \text{ кг/м}^2\text{с}$).

При интенсивных вдувах газа ускорение оказывает существенное влияние на функцию тепло-массообмена Ψ и параметр проницаемости b^r . Так, в опытах 3 скорость в ядре потока на длине рабочего участка $x=80 \text{ мм}$ вследствие вдува и неизотермичности возросла только на 24%. При этом параметр проницаемости уменьшился на такую же величину, а значение Ψ в соответствии с формулой (10) увеличилось в 2,8 раза. Таким образом, сравнительно небольшое ускорение основного потока

привело к увеличению скорости выгорания в этой точке почти в 3 раза.

На рис. 4 экспериментальные результаты, полученные в сечении $x=50 \text{ мм}$ ($x/d=1,4$), построены в виде зависимости интенсивности выгорания графита от интенсивности вдува инертного газа. Как видно, вдув существенно снижает скорость химической эрозии поверхности, причем более эффективным является вдув газа с меньшим молекулярным весом. Результаты опытов удовлетворительно согласуются с теоретическим расчетом по формулам (10) и (14), который, как было показано ранее, при постоянном вдуве по длине ($j_r = \text{const}$) производится методом последовательных приближений.

Далее проводилось обобщение полученных результатов и сопоставление их с относительным законом тепло-массообмена при вдуве в условиях существенной неизотермичности при $\psi_1 > 1$. Методика обработки опытных данных была следующей. По измеренным величинам скорости выгорания и параметрам потока в ядре определялись значения диффузионного числа Стантона

$$St = j_c / \rho_0 \omega_0 b_1^c = j_c / 0,173 \rho_0 \omega_0$$

и параметры проницаемости стенки b_1^r и b_1^z . Экспериментальные значения диффузионного числа Рейнольдса находились по формуле (4), записанной для углерода

$$Re_c^{**} = \left[\int_0^x j_c dx \right] / \mu_0 K(C)_w.$$

В опытах Re_c^{**} изменялось от 250 до $4,5 \cdot 10^3$. Число Стантона St_0 в стандартных условиях (непроницаемая поверхность, $\psi_1=1$) определялось

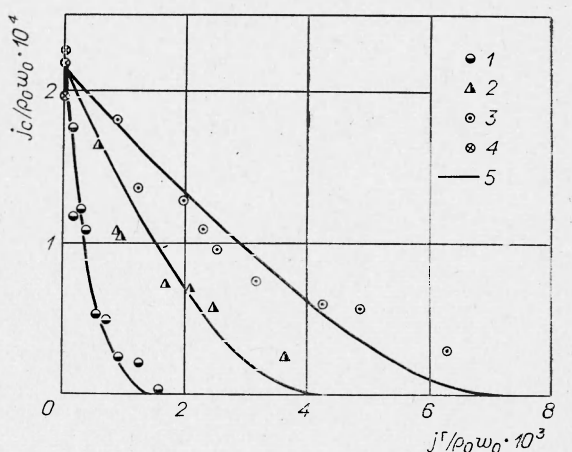


Рис. 4. Зависимость интенсивности выгорания графита в сечении $x=50 \text{ мм}$ от интенсивности вдува газов.

1 — гелий; 2 — азот; 3 — аргон; 4 — $j_r=0$; 5 — расчет по формуле (14).

по формуле (9), после чего получалось значение относительного числа Стантона и параметра вдува

$$\Psi = (St/St_0)_{Re^{**}}, \quad b^r = j_r / \rho_0 \omega_0 St_0 = b_1^r \Psi.$$

На рис. 5, а (вдув гелия) и 5, б (вдув аргона) результаты опытов построены в виде зависимости относительного коэффициента Ψ от параметра вдува инертного газа δ^r . Как было показано в [4], при отсутствии вдува основное влияние на тепломассообмен реагирующей графитовой стенки оказывает неизотермичность потока и $\Psi \approx \Psi_T$.

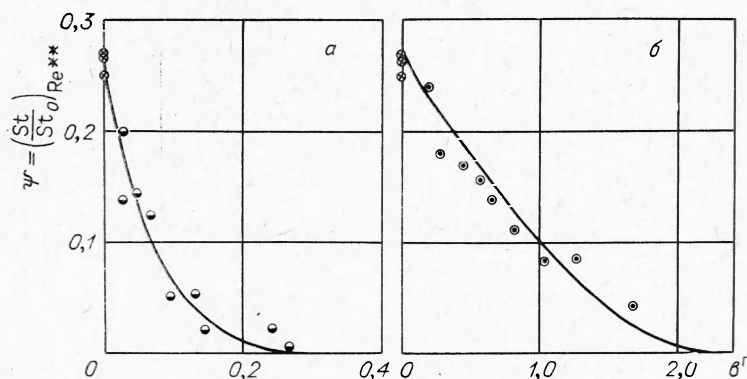


Рис. 5. Относительный коэффициент тепломассообмена на пористой графитовой поверхности ($x=50$ мм) при вдуве гелия (а) и аргона (б). Кривые — расчет по формуле (10).

В опытах со вдувом азота значение энтальпийного фактора неизотермичности сохранялось тем же, что и без вдува ($\psi_1 \approx 7,5$). При вдуве аргона его значение было несколько ниже ($3,5 \leq \psi_1 \leq 6,1$) и значительно выше при вдуве гелия ($10 \leq \psi_1 \leq 33$). Как видно из рис. 5, с увеличением неизотермичности потока при $\psi_1 > 1$ эффективность пористого вдува увеличивается. При этом снижаются как интенсивность химической эро-

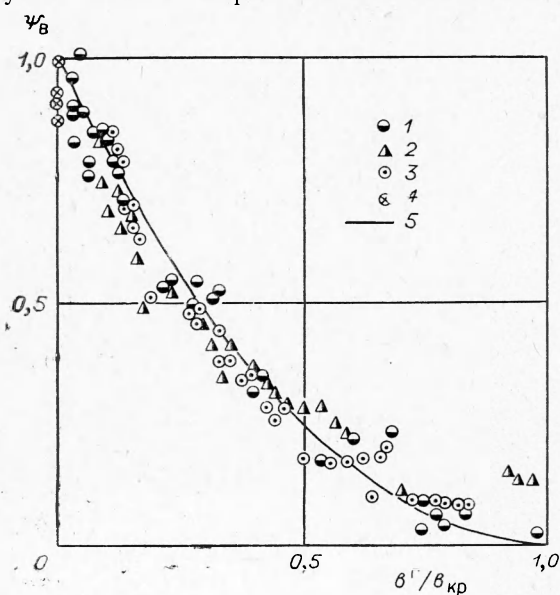


Рис. 6. Относительное влияние вдува на тепломассообмен в неизотермических условиях.
1 — гелий; 2 — азот; 3 — аргон; 4 — $j_r = 0$; 5 — расчет по формуле работы [3].

зии поверхности, так и значения критических параметров вдува. В рассматриваемых условиях по сравнению с изотермическими [3] значения $b_{кр}$ снизились примерно в 4 раза.

Расчет по формуле (10) удовлетворительно согласуется с опытами. При этом значение критического параметра вдува определялось по формуле (12) с учетом влияния конечности числа Рейнольдса.

На рис. 6 в этих же опытах в соответствии с формулой (10) выделено относительное влияние вдува инертного газа на тепломассообмен на реагирующей поверхности $\Psi_b = \Psi/\Psi_T$. Видно, что зависимость коэффициентов тепломассообмена от поперечного потока ве-

щества на стенке в неизотермических условиях сохраняется такой же, как и в изотермических, если значение критического параметра вдува $b_{кр}$ определяется с учетом влияния неизотермичности по формуле (12). В этом случае экспериментальные результаты согласуются с формулой

$$\Psi_b = \Psi/\Psi_T = (1 - b^\Sigma/b_{кр})^2.$$

Проведенные оценки показывают, что погрешность определения экспериментальных значений величин Ψ_T и b_T в области вдувов $b_T/b_{кр} \leq 0,6$ не превышала 20%.

Следует отметить, что при более интенсивных вдувах ($b^T \rightarrow b_{кр}$) точность опытов снижается. В этом случае толщина выгорания поверхности стремится к нулю и может сказываться влияние механического уноса и сублимации поверхности, которые при интенсивности выгорания были пренебрежимо малы.

На рис. 7 предлагаемый метод расчета сопоставляется с опытами работы [6] по выгоранию графитового канала в воздушной и азотной плазме, когда фактор неизотермичности был меньше единицы ($0,3 < \psi_1 < 0,6$). Через графитовую стенку вдувался аргон. В этом случае неизотермичность увеличивала скорость химической эрозии и снижала эффективность вдува. Из сопоставления этих результатов с опытами при вдуве аргона, приведенными на рис. 5, б, видно, что критический параметр вдува при $\psi_1 < 1$ увеличился примерно в 5 раз.

На зависимость критического параметра вдува от фактора неизотермичности ранее обращалось внимание также в работах [7, 8].

Таким образом, в диффузионном режиме выгорания вдув инертного газа значительно снижает скорость химической эрозии реагирующей поверхности. Эффективность вдува увеличивается с уменьшением молекулярного веса вдуваемого газа и с увеличением фактора неизотермичности.

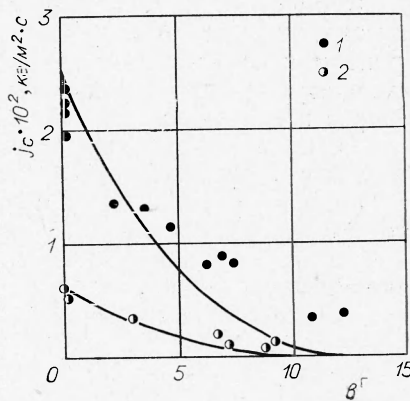


Рис. 7. Влияние вдува аргона на выгорание графита в плазменном потоке (кривые — расчет по формуле (14)): 1 — воздуха с $K(O)_0 \approx 0,21$; 2 — азота с $K(O)_0 \approx 0,05$ при $T_0 \approx 2800^\circ \text{K}$, $T_w = 1700 \pm 1970^\circ \text{K}$.

Поступила в редакцию
15/II 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. П. Волчков, Е. Г. Зауличный и др. ТВТ, 1970, 8, 1, 116.
2. А. И. Леонтьев, Э. П. Волчков, Е. Г. Зауличный. ИФЖ, 1969, XVII, 31.
3. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1964.
4. А. И. Леонтьев, Э. П. Волчков и др. ФГВ, 1967, 3, 2, 248.
5. А. И. Леонтьев, А. В. Фафурин, П. В. Никитин. ТВТ, 1969, 7, 2, 276.
6. Г. М. Щеголев, Ю. П. Кукота и др. Сб. «Вопросы технической теплофизики», вып. 2. Киев, «Наукова думка», 1969.
7. А. И. Леонтьев, Б. П. Миронов, А. В. Фафурин. ТВТ, 1969, 7, 6, 1134.
8. Б. П. Миронов, А. А. Зеленгур и др. Сб. «Тепло- и массоперенос», т. 1. Минск, 1972.