

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВЫХ ЗАВЕС НА ВЫГОРАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВДУВЕ ИНОРОДНОГО ГАЗА

Э. И. Волчков, Е. И. Синайко

(Новосибирск)

Приведены результаты систематического экспериментального исследования эффективности газовой завесы на выгорающей графитовой поверхности при различных способах ее организации и вдуве инородного газа в пограничный слой. В экспериментах числа Рейнольдса изменялись в пределах $R_\Delta \approx 1.2 \cdot 10^5 = 1.6 \cdot 10^6$, $R^* \approx 100 - 2000$, $R_z = 2.3 \cdot 10^2 - 1.5 \cdot 10^4$, энтальпийный фактор неизотермичности в начальном сечении изменялся от $i_s / i_0 = 1$ при тангенциальном вдуве азота до $i_s / i_0 \approx 34$ при вдуве гелия через нагреваемый пористый участок.

Защита с помощью газовых завес различных конструктивных элементов от воздействия высокотемпературных и химических агрессивных газовых потоков осуществляется, как правило, в сложных газодинамических условиях. Проблема расчета пограничного слоя в этих условиях осложняется необходимостью учета влияния на его характеристики различных возмущающих факторов: неизотермичности, инородного вдува, химических реакций на стенке и т. п. Авторами было исследовано [1] выгорание графитовых поверхностей в условиях однородного тангенциального вдува. В [1] показано, что относительная функция тепломассообмена в случае однородного турбулентного пограничного слоя имеет такой же вид, как и при выгорании без завесы

$$(1) \quad \Psi = \left(\frac{2}{V\psi_1 + 1} \right)^2 \left(1 - \frac{b^*}{b_c} \right)^2,$$

$$\psi_1 = \frac{i_w}{i_w^*}, \quad b^* = j_w / \rho_0 W_0 St_0 = b_1 \Psi$$

где ψ_1 — энтальпийный фактор неизотермичности, b_c — критический параметр вдува.

В случае однородного вдува влияние завесы учитывается через параметр проницаемости.

$$(2) \quad b_1^* = 0.75 K_0 (1 - \theta)$$

где K_0 — концентрация кислорода в основном потоке, θ — эффективность. Экспериментальные исследования по влиянию неоднородного вдува на интенсивность тепломассообмена в условиях завесы отсутствуют. В [2] показано, что для случая неоднородного вдува в турбулентном пограничном слое, относительная функция тепломассообмена имеет вид

$$(3) \quad \Psi = \frac{M_w^* T_0}{M_0 T_w^*} \left(\frac{2}{V\psi_1 + 1} \right)^2 \left(1 - \frac{b^*}{b_c} \right)^2$$

где M_0 , M_w^* — молекулярный вес основного потока и смеси газов на адиабатической не реагирующей стенке; T_0 , T_w^* — температура основного

потока и адиабатической стенки. Соотношение (3) отличается от соотношения (1) множителем $M_w^* T_0 / M_0 T_w^*$, учитывающим влияние завесы на относительную функцию Ψ и на параметр оттеснения пограничного слоя b_c , который при $\psi_1 > 1$ определяется выражением

$$b_c = \frac{M_w^* T_0}{M_0 T_w^*} \left(\arccos \frac{2 - \psi_1}{\psi_1} \right)^2$$

В данной работе для проверки теоретической зависимости (3) проведены систематические экспериментальные исследования эффективности газовой завесы на выгорающей графитовой поверхности при вдуве инородного газа. Опыты проводились на установке с индукционным нагревом цилиндрического графитового канала, описание которой и методика проведения экспериментов приведены в работах [1,3]. Исследовано выгорание при двух схемах организации завесы: а) вдув инертного газа через тангенциальную щель, б) вдув инертного газа через начальный пористый участок.

В случае тангенциального вдува инертного газа рабочий участок, схема которого приведена в [1], состоял из двух соосно установленных профилированных сопел, обеспечивающих равномерные профили скоростей воздуха и вдуваемого газа на входе в графитовый канал. Диаметр наружного сопла был равен внутреннему диаметру графитового канала и составлял 41 мм, диаметр внутреннего сопла 38.92 мм. Стенка графитового канала толщиной 5—10 мм нагревалась до температуры $T_w = 1600—2000^\circ \text{K}$ с помощью высокочастотной установки. Воздух с температурой $T_0 \approx 290^\circ \text{K}$ подавался в опытный участок через внутреннее сопло, вдуваемый газ (азот, аргон или гелий) с той же температурой подавался через щель шириной 2.08 мм, образованную соплами. Длина графитового канала $l \approx 190 \text{ мм}$. Плотность испытанных графитовых образцов изменялась от 1000 до 1925 кг/м³. В проведенных экспериментах числа Рейнольдса изменялись в пределах $R_\Delta \approx 1.2 \cdot 10^5—1.6 \cdot 10^6$, $R^* \approx 100—2000$, $R_s \approx 2.3 \cdot 10^2—1.5 \cdot 10^4$, что обеспечивало турбулентный режим течения в пограничном слое. Экспериментальное значение интенсивности выгорания, число Стантона и числа Рейнольдса определялись соотношениями

$$j = \frac{\delta \rho}{\tau}, \quad St = \frac{j_c}{\rho_0 W_0 b_1^*}, \quad R_\Delta = \frac{\rho_0 w_0 \Delta}{\mu_0}, \quad R_s = \frac{\rho_s w_s \Delta}{\mu_s},$$

$$R^* = \frac{(1 + b_1^*) \int_0^x j_c dx}{g \mu_0 b_1^*}$$

где δ — толщина выгоревшего слоя, ρ — плотность графита, τ — время выгорания, Δ — длина канала, отсчитываемая от сечения, где начиналось выгорание. При обработке экспериментальных результатов энтальпия, теплоемкость и молекулярный вес смеси газов определялись из соотношений

$$j_\Sigma = \sum_i^n K_i, \quad c_{p\Sigma} = \sum_i^n c_{pi} K_i, \quad \frac{1}{M_\Sigma} = \sum_i^n \frac{K_i}{M_i}$$

где K_i — весовая концентрация i -й компоненты газа, c_{pi} , M_i — теплоемкость и молекулярный вес. Вязкость смеси газов определялась по формуле Уилка.

Проведено три серии опытов при вдуве через тангенциальную щель и три серии опытов при вдуве через начальный пористый участок азота.

аргона или гелия. Цель опытов заключалась в исследовании влияния каждого фактора в отдельности (параметра проницаемости, молекулярного веса вдуваемого газа, температурного и энтальпийного факторов, неизотермичности) и их совместного влияния на интенсивность выгорания графитовой поверхности.

При вдуве через тангенциальную щель температуры вдуваемого газа и основного потока равны между собой $T_0 \approx T_s \approx 290^\circ \text{К}$. Температурный фактор, определяемый по температуре стенки в адиабатических условиях с завесой, равнялся единице $T_0 / T_w^* = T_0 / T_s = 1$. Это позволило выделить влияние отдельных факторов на интенсивность выгорания.

В первой серии экспериментов с завесой инертного газа было проведено исследование выгорания графитовой поверхности в потоке воздуха при тангенциальном вдуве азота, т. е. $M_0 = M_s$. В условиях этих опытов по сравнению с опытами без завесы [3] интенсивность выгорания изменялась по длине канала в соответствии с изменением параметра проницаемости (2). Относительная функция $\bar{Y}$ сохраняла такой же вид, как и без завесы (4). Анализ этих экспериментов дан в [1]. Во второй и третьей сериях опытов в поток воздуха через тангенциальную щель вдувался аргон или гелий с температурой $T_s \approx T_0 \approx 290^\circ \text{К}$. Выполнялось условие $T_0 / T_w^* \approx T_0 / T_s \approx 1$, но молекулярный вес смеси газов на адиабатической не реагирующей стенке M_w^* изменялся по длине канала за счет турбулентного перемешивания вдуваемого газа с потоком воздуха.

Как показывают расчеты, теплоемкость и молекулярный вес газов на стенке за счет выгорания поверхности изменяются мало. Поэтому в опытах энтальпийный фактор неизотермичности $\psi_1 = i_w / i_w^*$ сохранял по длине канала постоянное значение и по величине соответствовал случаю выгорания в потоке чистого воздуха $\psi_1 = 7-9$.

На фиг. 1 приведены результаты опытов по интенсивности выгорания $\bar{J} = j_c / \rho_0 W_0$ графитовой поверхности в потоке воздуха при вдуве через тангенциальную щель гелия. Массовый поток воздуха составлял $\rho_0 W_0 = 150 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$. Опытные точки 1 получены при параметре вдува $\rho_s W_s / \rho_0 W_0 = 0.041$, точки 2 — при параметре вдува $\rho_s W_s / \rho_0 W_0 = 0.073$.

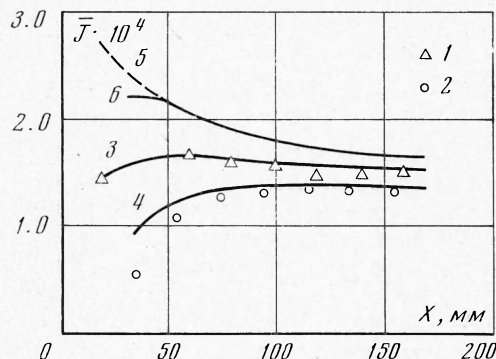
Как показано в [1], при наличии завесы инертного газа интенсивность выгорания графитовой поверхности может быть определена по формуле

$$(4) \quad j_c / \rho_0 W_0 = 2.9 \cdot 10^{-2} b_1^* R_{\Delta}^{-0.2} S^{-0.6} \Psi^{0.8} (\mu_w / \mu_0)^{0.2}$$

где S — число Шмидта, μ_w, μ_0 — вязкость на стенке и в основном потоке. Относительная функция массообмена Ψ рассчитывалась по формуле (3), которая для рассматриваемого случая имеет вид

$$(5) \quad \Psi = \frac{M_w^*}{M_0} \left(\frac{2}{V \psi_1 + 1} \right)^2$$

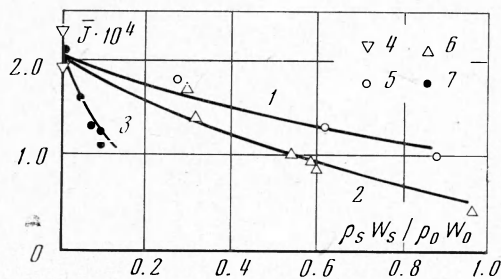
На фиг. 1 приведены кривые 3 и 4, рассчитанные по формулам (4) и (5). Кривые 5 и 6 рассчитаны по этим же формулам соответственно для усло-



Фиг. 1

вий экспериментов 3 и 4, но без учета молекулярного веса M_w^* / M_0 в формуле (5). Эти кривые лежат значительно выше экспериментальных точек, т. е. наличие завесы необходимо учитывать в относительных законах теплообмена.

Влияние молекулярного веса вдуваемого газа на интенсивность выгорания видно на фиг. 2, где представлена зависимость интенсивности



Фиг. 2

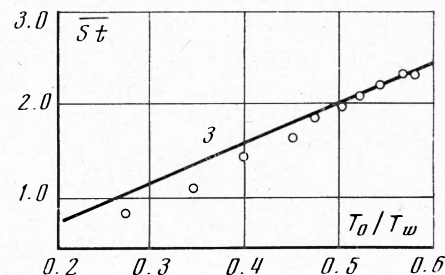
выгорания $\bar{J} = j_c / \rho_0 W_0$ от относительного вдува аргона (4, 5), азота (6), гелия (7). Кривые 1, 2, 3 — расчет по формулам (4) и (5) для аргона, азота и гелия. Как видно из графика, при одинаковых массовых расходах вдуваемого газа и прочих равных условиях ($S = 2.08$ мм, $\Delta = 60$ мм, $T_w = 2000^\circ \text{K}$, $\rho_0 W_0 = 150 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$) интенсивность выгорания ниже при вдуве более легкого газа.

При экспериментальном исследовании интенсивности выгорания графитовой поверхности в условиях газовой завесы за участком пористого вдува внутреннее сопло убиралось и воздух с температурой $T_0 = 290^\circ \text{K}$ подавался в канал (первичный поток). Вторичный поток инертного газа вдувался в пограничный слой через пористую секцию шириной $S = 40$ мм, выполненную из пористого графита ПГ-50 пористостью 50%. Остальная часть рабочего участка выполнялась из плотного графита В-1. Во время опыта разогревались плотный и пористый участки одновременно, что позволяло изменять теплосодержание вдуваемого газа.

В первой серии опытов предусматривалось проверить в условиях завесы влияние температурного фактора T_0 / T_w^* на интенсивность выгорания графитовой поверхности. Проведены эксперименты со вдувом азота через пористый участок, где выполнялось условие $M_w^* / M_0 = M_s / M_0 = 1$. В отличие от случая щелевого вдува азот, проходя через пористый графит нагревался и его температура изменялась в пределах $1510^\circ \text{K} < T_s < 1970^\circ \text{K}$ ($i_s / i_0 = 6-8.5$). Ниже по течению за участком пористого вдува температура стенки, соответствующая адиабатическим условиям T_w^* , изменялась по длине. На фиг. 3 приведены опытные данные, обработанные в форме зависимости относительного числа Стантона $\bar{St} = St / St_0 (\sqrt{\Psi_1} + 1)^2$ от температурного фактора T_0 / T_w^* . Массовая скорость основного потока $\rho_0 W_0 \approx 105 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, температура непроницаемой стенки $T_w \approx 1950^\circ \text{K}$, пористой — $T_s \approx 1510-1970^\circ \text{K}$, плотность плотного графита $\rho = 1925 \text{ кг/м}^3$. Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетом по формуле (6)

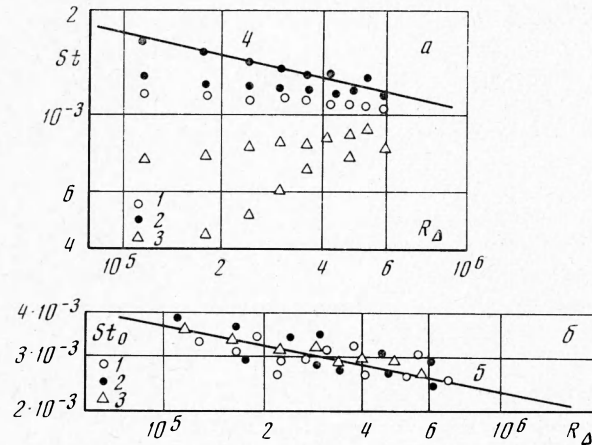
$$(6) \quad \Psi_1 = \frac{T_0}{T_w^*} \left(\frac{2}{\sqrt{\Psi_1} + 1} \right)^2$$

Во второй и третьей сериях опытов через начальный пористый участок вдувались аргон и гелий. Это позволило исследовать одновременно влия-



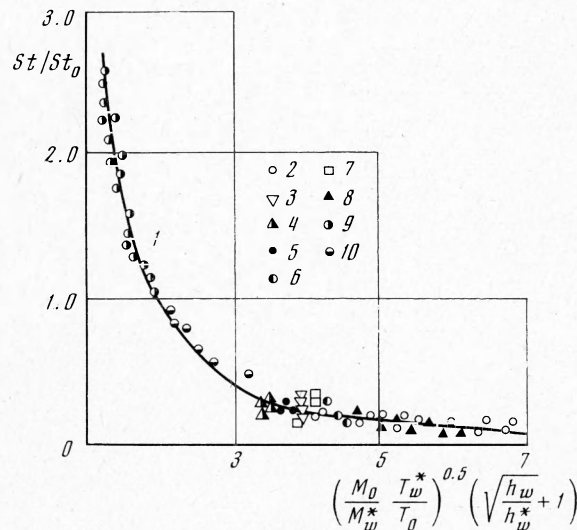
Фиг. 3

ние всех параметров (M_w^* / M_0 , T_0 / T_w^* , ψ_1 и b_1^*) на интенсивность выгорания графитовой поверхности. Энтальпийный фактор неизотермичности i_s / i_0 на пористом участке изменялся от 3 при вдуве аргона до 34 при вдуве гелия. На фиг. 4, а представлены опытные данные по вдуву азота



Фиг. 4

1 ($\rho_s w_s = 1.25 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$), аргона 2 ($\rho_s w_s = 0.8$ и $1.88 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$), гелия 3 ($\rho_s w_s = 0.8$ и $1.4 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$) через пористую секцию в виде зависимости диффузионного числа Стантона $St = j_c / \rho_0 w_0 b_1^*$ от R_Δ , рассчитанного



Фиг. 5

по длине плотного графитового участка. Массовая скорость основного потока $\rho_0 w_0 = 105 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$. Кривая 4 — расчет по формулам (4) и (1). Как видно из графика, наблюдается расслоение опытных данных. Если экспериментальные данные с помощью формулы (3) привести к стандартным условиям и обработать в форме зависимости числа Стантона $St_0 = j_c / \rho_0 w_0 b_1^* \Psi^{0.8}$ от R_Δ (фиг. 4, б), то они удовлетворительно обобщаются

(кривая 5) зависимостью

$$St_0 = St / \Psi^{0.8} = 2.9 \cdot 10^{-2} R_{\Delta}^{-0.2} S^{-0.6} [(\mu_w/\mu_0)^{0.2}]$$

На фиг. 5 представлены результаты всех опытов по интенсивности массообмена на выгорающей графитовой поверхности: 2 — без вдува; 3, 4, 5 — тангенциальный вдув азота, аргона и гелия; 6, 7, 8 — выгорание за участком пористого вдува азота, аргона и гелия. Как показывают расчеты, в условиях проведения этих опытов влияние поперечного потока вещества на тепломассообмен не превышало 10%, т. е. основное влияние оказывала неизотермичность потока. В условиях завесы это влияние определяется по формуле (3) (кривая 1), которая удовлетворительно согласуется с опытами. Отклонение экспериментальных точек от расчета можно объяснить влиянием термодиффузии [4].

На этом графике приведены опытные данные 9 (по относительным коэффициентам теплообмена [5]) и 10 (по коэффициентам трения [6]), полученные в условиях больших температурных напоров ($0.1 < \psi_1 < 7$) в турбулентном пограничном слое без завесы.

Поступила 26 III 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Волчков Э. П., Зауличный Е. Г., Леонтьев А. И., Синайко Е. И. Взаимодействие графитовой поверхности с турбулентным потоком газа в условиях существенной неизотермичности и при наличии завесы из нейтрального газа. Теплофизика высоких температур, 1970, т. 8, вып. 1.
2. Волчков Э. П. Тепломассообмен в неизотермическом турбулентном потоке при наличии завесы инородного газа. ПМТФ, 1974, № 5.
3. Леонтьев А. И., Волчков Э. П., Зауличный Е. И., Синайко Е. И. Экспериментальное определение скорости уноса графита в условиях существенной неизотермичности. Физика горения и взрыва, 1967, т. 3, № 2.
4. Волчков Э. П., Никитин П. В., Синайко Е. И. Оценка влияния термодиффузии на интенсивность выгорания поверхности в неоднородном турбулентном пограничном слое. ПМТФ, 1972, № 5.
5. Леонтьев А. И., Миронов Б. П., Фафурин А. В. Экспериментальное исследование турбулентного теплообмена в начальном и стабилизированном участках цилиндрической трубы в условиях существенной неизотермичности. Инж.-физ. ж., 1969, т. 16, № 4.
6. Perkins H. C., Worsol-Schmidt P. Turbulent heat and momentum transfer for gases in a circular tube at wall to bulk temperature ratios to seven. Internat. J. Heat and Mass Trans., 1965, vol. 8, No. 7, pp. 1011—1031.