

УДК 532.526.4

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГРАФИТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННОЙ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ И ПРИ НАЛИЧИИ ЗАВЕСЫ ИЗ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА

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

Приводятся результаты опытов по выгоранию графитовой поверхности при наличии завесы из нейтрального газа. Предлагается метод расчета эффективности газовой завесы в условиях существенной неизотермичности, основанный на решении интегрального соотношения диффузии с привлечением предельных относительных законов массообмена и равновесной концентрации окислителя на стенке. Дается сопоставление полученных опытных данных с предложенным методом.

Исследованию заградительного охлаждения посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ.

Большинство экспериментальных исследований турбулентного пограничного слоя проведено в квазиизотермических условиях, когда температура стенки близка к температуре основного потока. В [1—4] показано, что в этом случае достаточно удовлетворительные результаты дают методы расчета, основанные на решении интегральных соотношений импульсов и энергии и использующие в качестве характерного перепада температур разность между адиабатической температурой стенки и температурой стенки при наличии теплообмена ($\Delta t = t_{ст}^* - t_{ст}$). Однако вопрос о влиянии неизотермичности на процессы турбулентного теплообмена в газовых завесах недостаточно исследован несмотря на его практическое значение.

В данной работе приводятся результаты опытов по выгоранию графитовой поверхности в присутствии завесы из нейтрального газа. Опытами охвачен диапазон изменения числа Re_x от $4 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^6$ и энтальпийного фактора $h_{ст} / h_0$ от 1 до 9. Полученные опытные данные по интенсивности выгорания сопоставляются с предложенным методом расчета, основанным на решении интегрального соотношения диффузии с привлечением предельных относительных законов массообмена и «равновесной» концентрации окислителя на стенке.

Интегральное соотношение энергии и параметр проницаемости при наличии завесы и химических реакций на стенке. Рассмотрим обтекание плоской графитовой стенки потоком газа, содержащего кислород. Стенка разогрета до температуры порядка 2000°K , и химические реакции протекают в диффузионной области, т. е. интенсивность выгорания определяется скоростью подвода окислителя к стенке. При подаче через плоскую щель инертного газа вдоль поверхности пластины при отсутствии химических реакций концентрация окислителя на поверхности будет изменяться по длине и определяться процессами турбулентного массообмена в пограничном слое. На некотором расстоянии от щели концентрация окислителя на стенке будет равна нулю. Протяженность этой зоны определяется закономерностями смешения двух спутных струй и, как показа-

но в [5],

$$\frac{x_0}{s} = \left[\left(0,11 + 0,036 \frac{w_0}{w_s} \right) \frac{w_0 - w_s}{w_0 + w_s} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где s — ширина щели, w_0 и w_s — скорости основного и вдуваемого потоков соответственно. При течении газов, когда $Pr \approx Sc \approx 1,0$, можно принять подобие профилей полных энтальпий и приведенных концентраций, тогда

$$\theta = \frac{h_0 - h_{ст}^*}{h_0 - h_s} = \frac{(\tilde{k}_i)_0 - (\tilde{k}_i)_{ст}^*}{(\tilde{k}_i)_0 + (\tilde{k}_i)_s}, \quad (2)$$

где $(\tilde{k}_i)_0$, $(\tilde{k}_i)_s$, $(\tilde{k}_i)_{ст}^*$ — приведенные концентрации i -го химического элемента в основном потоке, в щели и на стенке при отсутствии химических реакций. В [1] показано, что для квазиизотермических условий эффективность газовой завесы на плоской стенке при вдуве газа через щель можно определить по формуле

$$\theta = [1 + 0,24 (Re_{\Delta x} / Re_s^{1,25})]^{-0,8}. \quad (3)$$

Формула (3) хорошо подтверждается опытными данными по концентрации гелия на стенке, приведенными в [6]. Таким образом, концентрацию окислителя на графитовой стенке при отсутствии химических реакций на поверхности можно получить в виде

$$(\tilde{k}_0)_{ст}^* = (\tilde{k}_0)_0 (1 - \theta). \quad (4)$$

Записывая уравнение диффузии i -го компонента через приведенные концентрации для случая инертной и химически реагирующей стенки и проделав преобразования, аналогичные преобразованиям с уравнениями теплового пограничного слоя, приведенными в [1], получим интегральное соотношение диффузии на реагирующей стенке

$$\frac{1}{\Delta \tilde{k}} \frac{d[Re_{д}^{**} \Delta \tilde{k}]}{d\bar{x}} - \frac{j_{ст}}{\gamma_0 w_0} Re_L = St_D Re_L, \quad (5)$$

где $\Delta \tilde{k} = \tilde{k}_{ст} - \tilde{k}_{ст}^*$, $\bar{x} = x / L$, $Re_{д}^{**} = \frac{\gamma_0 w_0 \delta_{д}^{**}}{g \mu_0}$,

$$\delta_{д}^{**} = \int_0^{\delta} \frac{\rho w}{\rho_0 w_0} \left(\frac{\tilde{k}_i - \tilde{k}_i^*}{\tilde{k}_{i_{ст}} - \tilde{k}_{i_{ст}}^*} \right) dy,$$

$\tilde{k}_i^*$ — приведенная концентрация i -го компонента в пограничном слое на химически не реагирующей стенке

$$St_D = \frac{-\rho D (\partial \tilde{k}_i / \partial y)_{ст}}{\gamma_0 w_0 \Delta \tilde{k}}, \quad Re_L = \frac{\gamma_0 w_0 L}{g \mu_0}.$$

Из дифференциального уравнения диффузии, записанного для условий на стенке, следует

$$-\rho D \left(\frac{\partial \tilde{k}_i}{\partial y} \right)_{ст} = j_{i_{ст}} - (\rho w_y)_{ст} (\tilde{k}_i)_{ст}, \quad -\rho D \left(\frac{\partial \tilde{k}_i^*}{\partial y} \right)_{ст} = 0. \quad (6)$$

Следовательно,

$$St_D = j_c [(j_{i_{ст}} / j_c) - \tilde{k}_{i_{ст}}] \times [\gamma_0 w_0 (\tilde{k}_{i_{ст}} - \tilde{k}_{i_{ст}}^*)]^{-1}. \quad (7)$$

Введем диффузионный параметр проницаемости

$$b_1^* = \frac{j_c}{\gamma_0 w_0 St_D} = \frac{\tilde{k}_{i_{ст}} - \tilde{k}_{i_{ст}}^*}{(j_{i_{ст}} / j_c) - \tilde{k}_{i_{ст}}}, \quad (8)$$

где j_c — суммарный поперечный поток вещества на реагирующей поверхности. Параметр проницаемости b_1^* для случая выгорания графитовой поверхности определяется из очевидных соотношений:

а) через концентрацию углерода $[(\tilde{k}_C^*)_{ст} = 0; j_{ист} = j_c]$

$$b_1^* = (\tilde{k}_C)_{ст} / [1 - (\tilde{k}_C)_{ст}], \text{ отсюда } (\tilde{k}_C)_{ст} = b_1^* / (1 + b_1^*); \quad (9)$$

б) через концентрацию кислорода ($j_{ист} = 0$)

$$b_1^* = (k_0^*)_{ст} / (\tilde{k}_0)_{ст} - 1. \quad (10)$$

Для диффузионного режима горения в области, где идет реакция $C + O \rightarrow CO$, имеем

$$(\tilde{k}_C)_{ст} = (12/28)(k_{CO})_{ст}; \quad (\tilde{k}_0)_{ст} = (16/28)(k_{CO})_{ст}, \quad (11)$$

где $(k_{CO})_{ст}$ — концентрация окиси углерода на стенке. Из равенств (9), (10) и (11) следует

$$b_1^* = [(\tilde{k}_C)_{ст} / (\tilde{k}_0)_{ст}] (\tilde{k}_0^*)_{ст} = (3/4) (\tilde{k}_0^*)_{ст}. \quad (12)$$

Концентрация кислорода на нереагирующей стенке определяется из уравнения (3)

$$(\tilde{k}_0^*)_{ст} = (\tilde{k}_0)_0(1 - \theta) + \theta(\tilde{k}_0)_s. \quad (13)$$

При вдуве через щель инертного газа $(\tilde{k}_0)_s = 0$ получаем

$$b_1^* = (3/4) (\tilde{k}_0)_0(1 - \theta). \quad (14)$$

Интегральное соотношение диффузии (5) удобно записать так:

$$\frac{d\text{Re}_d^{**}}{d\bar{x}} + \frac{\text{Re}_d^{**}}{\Delta\tilde{k}} \frac{d(\Delta\tilde{k})}{d\bar{x}} = \text{Re}_L \text{St}_{d_0} \Psi_d (1 + b_1^*). \quad (15)$$

Принимая закон массообмена по аналогии с законом теплообмена [1], имеем

$$\text{St}_{d_0} = A \text{Re}_d^{**m} \text{Sc}^{-n}. \quad (16)$$

После интегрирования уравнения (15) получаем

$$\text{Re}_d^{**} = \frac{1}{\Delta\tilde{k}} \left[\frac{(1+m)A}{\text{Sc}^n} \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}} \text{Re}_L \left(\frac{\mu_{ст}}{\mu_0} \right)^m \Psi_d (1 + b_1^*) \Delta\tilde{k}^{(m+1)} d\bar{x} \right]^{1/(m+1)}, \quad (17)$$

где $\Psi_d = (\text{St}_d / \text{St}_{d_0}) \text{Re}_d^{**}$ — относительный закон массообмена; отношение диффузионного критерия Стентона в рассматриваемых условиях к диффузионному критерию Стентона в стандартных условиях при одинаковых значениях критерия Re_d^{**} . В первом приближении можно принять подобие процессов массообмена и теплообмена и воспользоваться предельными относительными законами теплообмена [1]. Для турбулентного пограничного слоя в диапазоне $\text{Re}_d^{**} < 10^4$ можно принять $A = 0,0126$; $m = 0,25$, $n = 0,75$. Применяя уравнение (15), для диффузии (3) углерода с учетом уравнения (17) получаем зависимость $\text{Re}_d^{**} = f(\bar{x})$ для заданных параметров на внешней границе пограничного слоя. Интенсивность выгорания углерода определяется по формуле

$$j_c = b_1^* \Psi_d \frac{A}{(\text{Re}_d^{**})^m \text{Sc}^n} \left(\frac{\mu_0}{\mu_{ст}} \right)^m. \quad (18)$$

При экспериментальном определении законов массообмена локальные

значения диффузионных критериев Рейнольдса Re_d^{**} подсчитываются по формуле [9]

$$Re_d^{**} = \frac{(1 + b_1^*) \int_0^x j_c dx}{g \mu_0 b_1^*} \quad (19)$$

Экспериментальное исследование выгорания графитовой поверхности при тангенциальном вдуве азота в турбулентный пограничный слой. Эксперименты проводились на установке с индукционным нагревом цилиндрического графитового канала, подробное описание которой дано в [7]. Схема рабочего участка, на котором проводились опыты, показана на рис. 1. Рабочий участок состоял из профилированных сопел 1 и 2, обеспечивающих равномерный профиль скоростей на входе в цилиндрический графитовый канал 3. Стенки графитового канала толщиной 5–10 мм нагревались до температуры $t_{ст} \approx 1500–1800^\circ\text{C}$ с помощью индуктора 4 высокочастотной установки мощностью 100 кВт и рабочей частотой порядка 75 кГц. Температура наружной стенки образца измерялась оптическим пирометром. Неравномерность распределения температуры стенки образца на длине от 30 до 160 мм не превышала 6%.

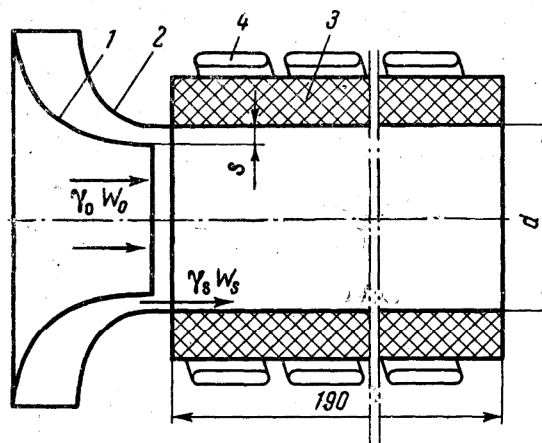


Рис. 1. Схема рабочего участка

Проведено две серии опытов. В первой тарировочной серии опытов измерялись интенсивности выгорания графита в потоке воздуха при отсутствии газовой завесы. Воздух с $t_0 \approx 20^\circ\text{C}$ подавался в опытный участок через входное сопло 2 диаметром 40 мм. Расход воздуха изменялся от 30 до 250 г/сек. Плотность испытанных графитовых образцов изменялась от 1076 до 1925 кг/м³. Вторая серия опытов проводилась при наличии завесы из азота, который подавался через щели шириной 1,8 и 2,08 мм, образованные соплами 1 и 2. Диаметр выходного сечения сопла 2 равен 40 мм при щели шириной 1,8 мм и 41 мм при щели шириной 2,08 мм. Толщина выходной кромки сопла 1 не более 0,3 мм. Расход азота менялся в пределах от 10 до 32 г/сек и измерялся стандартными ротаметрами.

Во время разогрева образца до рабочей температуры, а также во время охлаждения в конце опыта через канал подавался чистый азот или аргон, чтобы исключить возможное дополнительное выгорание материала. Азот или аргон под небольшим избыточным давлением (0,05 атм) подавался также в рабочую камеру, в которой находился рабочий участок, чтобы исключить возможное выгорание графита с наружной стороны. За время опытов ($\tau = 40 \div 300$ сек) унос графита составлял 1–1,5 мм на сторону. Интенсивность выгорания графита определялась по измерениям начального и конечного внутреннего диаметра канала, которые выполнялись на компараторе с ценой деления 1 мк.

Массовый поток вещества на стенке определялся по формуле

$$j_c = \delta \gamma_{гр} / \tau = (d_{кон} - d_0) \gamma_{гр} / 2\tau, \quad (20)$$

где $\delta = (d_{кон} - d_0) / 2$ — толщина выгоревшего слоя графита, $\gamma_{гр}$ — плотность графита, τ — время выгорания.

Величина диффузионного критерия Стентона подсчитывалась по формуле

$$St_d = j_c / \gamma_0 w_0 b_1^*. \quad (21)$$

В опытах без завесы параметр проницаемости b_1^* сохранял постоянное значение $b_1^* = (3/4) (\kappa_0)_0 = 0,173$. В опытах с завесой параметр проницаемости b_1^* определялся по формулам (3) и (14). Диффузионное число Рейнольдса Re_d^{**} определялось по формуле (19), а число $Re_{\Delta x}$ по формуле

$$Re_{\Delta x} = \gamma_0 w_0 \Delta x / g \mu_0, \quad (22)$$

где Δx — длина канала, отсчитываемая от сечения, с которого начиналось выгорание канала.

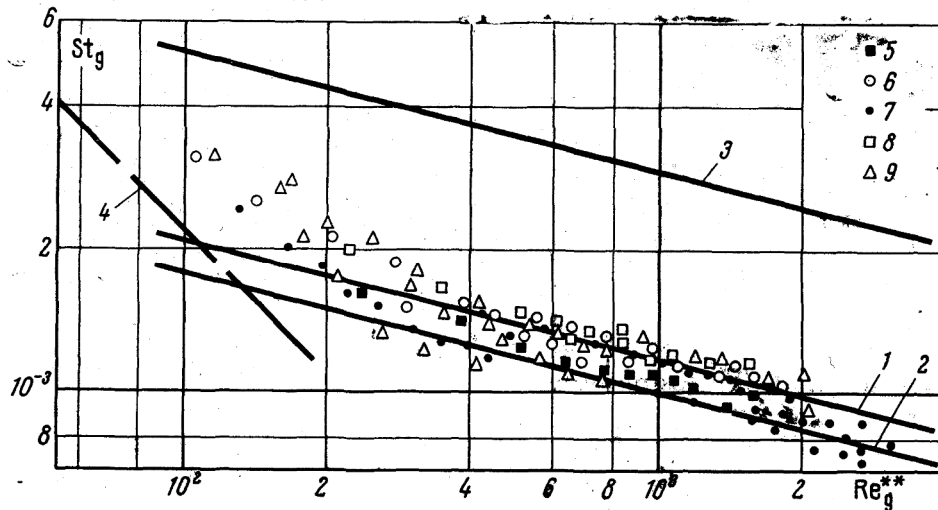


Рис. 2. Выгорание графитовой стенки в потоке воздуха:
1—3 — расчет по формуле (23) при $\psi_1 = 7, 9$ и 1 соответственно;
4 — расчет по формуле (24) при $\psi_1 = 8$;

	марка графита	плотность графита, кг/м ³	$\gamma_0 w_0$, кг/м ² .сек	$t_{ст}$, °C
5	В-1	1925	155	1600
6	ПНГ	1820	20—170	1660
7	ПРОГ-2400	1650	26—360	1600
8	МГ-1	1623	52—140	1720
9	ПГ-50	1076	25—160	1700

На рис. 2 приведены результаты экспериментов по интенсивности выгорания различных марок графитов в потоке воздуха. Опыты обработаны в виде зависимости диффузионного числа Стентона от числа Рейнольдса, построенного по толщине потери массы δ_d^{**} . Здесь же приводятся зависимости, полученные на основании аналогии процессов тепло- и массообмена и использования предельных относительных законов теплообмена [1, 8]. Эти зависимости имеют вид:

а) для турбулентного пограничного слоя

$$St_d = 0,0123 Re_d^{*-0,25} Sc^{-0,75} \Psi_T (\mu_{ст} / \mu_0)^{0,25}; \quad (23)$$

б) для ламинарного пограничного слоя

$$St_d = 0,22 Re_d^{*-1} Sc^{-4/3} \Psi_L, \quad (24)$$

где Ψ_T, Ψ_L — относительные предельные законы массообмена, учитывающие влияние неизотермичности и поперечного потока вещества. Согласно [1], для дозвуковых скоростей течения газа

$$\Psi_T = \left(\frac{2}{\sqrt{\psi_1 + 1}} \right)^2 \left(1 - \frac{b}{b_{кр}} \right)^2, \quad (25)$$

где

$$b_{кр} = b_{кр}^* \left(1 + \frac{0,83}{Re_d^{*0,14}} \right), \quad b_{кр}^* = \frac{1}{1 - \psi_1} \left[\ln \frac{1 + (1 - \psi_1)^{1/2}}{1 - (1 - \psi_1)^{1/2}} \right]^2 \quad \text{для } \psi_1 < 1,$$

$$b_{кр}^* = \frac{1}{\psi_1 - 1} \left(\arccos \frac{2 - \psi_1}{\psi_1} \right)^2 \quad \text{для } \psi_1 > 1,$$

$$\psi_1 = h_{ст} / h_{ст}^*.$$

При отсутствии газовой завесы $h_{ст}^* = h_0$. Как показывают расчеты, в условиях проведения опытов максимальное влияние поперечного потока вещества на величину диффузионного критерия Стентона не превышало 10%, т. е. находилось в пределах точности опытов. В то же время неизотермичность оказывала существенное влияние и уменьшала величину критерия St_d в два-три раза по сравнению с квазиизотермическими условиями. Теоретические зависимости, представленные на рис. 2, получены без учета влияния поперечного потока вещества.

Как видно из рис. 2, опытные данные для различных марок графитов находятся в удовлетворительном соответствии с предложенными законами массообмена для турбулентного пограничного слоя. На рис. 3 приводятся результаты обобщения данных по интенсивности выгорания графита при наличии завесы из инертного газа. Значения St_d и Re_d^{**} в этих условиях подсчитывались по формулам (21), (19), (14) и (3). Как видно из графика, при такой обработке опытные данные по коэффициентам массообмена при наличии газовой завесы практически совпадают с опытами без завесы, подтверждая тем самым справедливость формул (16) и (25) для

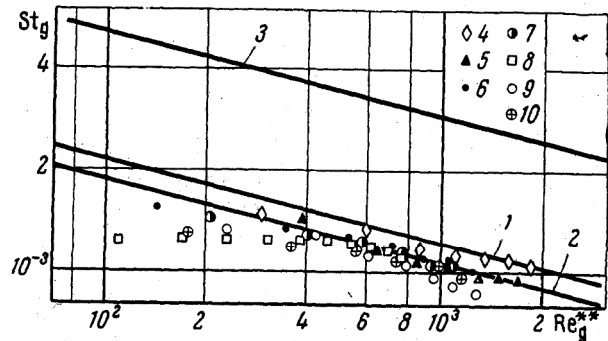


Рис. 3. Интенсивность выгорания графитовой стенки при наличии тангенциального вдува азота:

1—3 расчет по формуле (23)

	марка графита	$\gamma_0 w_0$, кг/м ² ·сек	$\gamma_3 w_3$, кг/м ² ·сек	$t_{ст}$, °C
4	ППГ	168	0	1620
5	В-1	156	0	1600
6	ПРОГ-2400	150	50	1620
7	ППГ	150	47,1	1650
8	ППГ	150	80,6	1600
9	ПРОГ-2400	210	59	1600
10	ППГ	215	123	1600

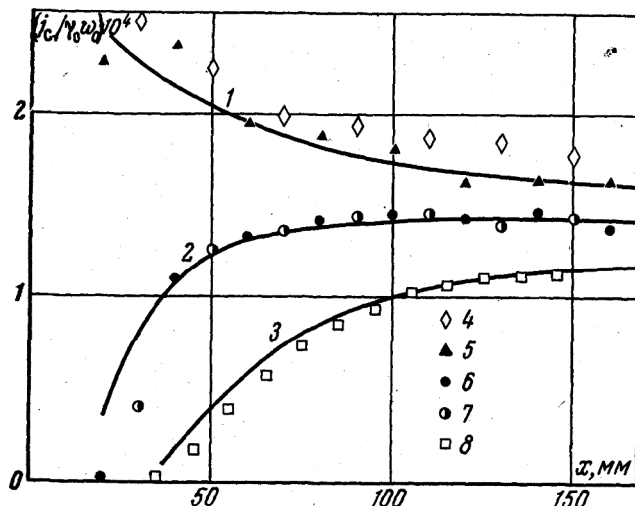


Рис. 4. Обобщение экспериментальных данных по выгоранию графитов в потоке воздуха с завесой азота и без нее:

1—3 — расчет по формуле (23) при $\psi_1 = 7, 9$ и 1 соответственно; 4—8 — обозначения те же, что и на рис. 3.

диффузии по формулам (17), (18) и (25), можно рассчитать интенсивность выгорания графитовой поверхности в различных сечениях канала.

рассматриваемых условий. Некоторое отклонение начальных точек от расчетных кривых при наличии газовой завесы объясняется тем, что в начальных сечениях незначительная ошибка в определении θ может привести к существенной ошибке в числе Стентона, (см. (21)), так как в параметр проницаемости b_1^* входит член $(1 - \theta)$. Следует также иметь в виду, что формула (3) получена, строго говоря, для больших значений x и может дать существенную погрешность в области малых значений x . Используя полученные законы массообмена и интегральные соотношения, можно рассчитать интенсивность выгорания графитовой поверхности в различных сечениях канала.

Принимая допущение, что в исследуемых условиях можно пренебречь изменениями параметров газа на внешней границе пограничного слоя и концентрацией углерода по длине канала, из уравнений (17) и (18) получаем

$$j_c / g \rho_0 w_0 = b_1^* St_d = b_1^* 0,029 Re_x^{-0,2} Sc^{-0,6} \Psi^{0,8} (\mu_{ст} / \mu_0)^{0,2}, \quad (26)$$

где $b_1^* = 0,173$ при отсутствии завесы и определяется по формулам (14) и (3) при наличии газовой завесы.

На рис. 4 приводится сопоставление результатов расчета интенсивности выгорания графитового канала по формуле (26) с полученными опытными данными. Можно отметить удовлетворительное соответствие предлагаемого метода расчета с опытами, а также значительное влияние вдува инертного газа на интенсивность выгорания графитовой поверхности. При более сложных граничных условиях, например при течении газа в сопле, для определения интенсивности массообмена необходимо воспользоваться уравнениями (17), (18) и (25). Учитывая консервативность законов турбулентного массообмена к изменению граничных условий, можно ожидать в этих случаях удовлетворительного соответствия теории с опытом.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 XI 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое (под ред. С. С. Кутателадзе). Изд. СО АН СССР, 1964.
2. Э. П. Волчков, В. Я. Левченко. ПМТФ, № 2, 1966.
3. R. A. Seban. Trans. ASME, ser. C, 82, № 4, 1960.
4. Хартнетт, Эккерт, Биркебак. Теплопередача, № 3, 1961.
5. Г. Н. Абрамович. Теория турбулентных струй. Физматгиз, 1960.
6. R. I. Goldstein, R. B. Rask, E. R. G. Eckert. Internat J. Heat and Mass Transfer, 9, № 12, 1966.
7. А. И. Леонтьев, Э. П. Волчков, Е. Г. Зауличный, Е. И. Синайко. Физика горения и взрыва, № 2, 248, 1967.
8. А. И. Леонтьев, Б. П. Миронов. ПМТФ, № 5, 1965.
9. А. И. Леонтьев, В. К. Федоров. Инж.-физ. ж., № 7, 1961.