

УДК 621:532.526.4

UDC 621:532.526.4

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРИСТЕННОЙ СТРУЕ ВОЗДУХА

TURBULENT HEAT AND MASS TRANSFER IN WALL-ADJACENT SUBMERGED JET OF AIR

Никитин Петр Владимирович
к.т.н., доцент

Nikitin Petr Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Хашченко Андрей Александрович
к.ф.-м.н., доцент

Khaschenko Andrey Aleksandrovich
Cand.Phys.-Math.Sci., associate professor

Стародубцева Галина Петровна
д.с.-х. н., профессор

Starodubtseva Galina Petrovna
Dr.Sci.Agr., professor

Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia

Дан анализ тепло и массопереноса в пристенной газовой струе для условий существенной неизотермичности. Расчётные зависимости интенсивности химической эрозии поверхности получены на основе интегральных соотношений для турбулентного пограничного слоя. Сопоставление расчётов с результатами опытов даёт удовлетворительное соответствие

The analysis of heat and mass transfer in the wall-adjacent jet of gas under essential non-isothermal conditions is given. The calculated relations of chemical erosion intensity of surface on the basis of integral correlation for the turbulent boundary layer are obtained. The presented calculations are successfully compared with the experimental results

Ключевые слова: ТЕПЛОМАССОБМЕН, СТРУЯ ВОЗДУХА, ПРИСТЕННАЯ, ХИМИЧЕСКАЯ ЭРОЗИЯ, ЭНТАЛЬПИЙНЫЙ ФАКТОР НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ u

Keywords: HEAT AND MASS TRANSFER, JET OF AIR, WALL-ADJACENT, CHEMICAL EROSION, ENTHALPY FACTOR OF NON-ISOTHERMICITY u

Воздействие струйных течений на обтекаемые поверхности имеет большой практический интерес, как следствие создания различных способов защиты стенок конструкций от агрессивных сред и разработки надёжных инженерных методов расчёта эффектов тепломассопереноса [1].

1. Аналитическое исследование пристенного пограничного слоя.

Рассмотрим турбулентную струю газа, вытекающую из щели и распространяющуюся вдоль поверхности (рис. 1). Из окружающего пространства газ подсасывается и перемешивается с вдуваемым газом. Обтекаемая поверхность может вступать в химические реакции с газовым потоком, в связи с чем на стенке создаётся поперечный поток вещества $j_w = r_w w_w$. На стенке нарастает пристенный пограничный слой толщиной d . На

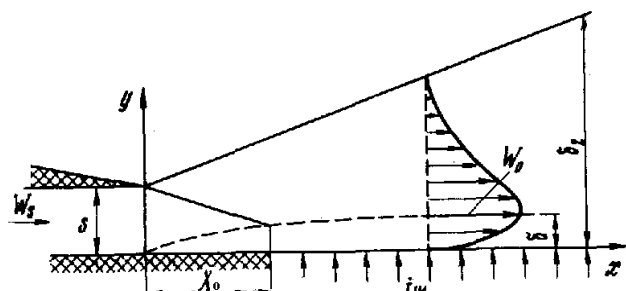


Рис.1 Схема пристенной затопленной струи

внешней границе этого слоя значение скорости равно максимальному в этом сечении $\partial w_x / \partial y = 0$.

Интегральное соотношение импульсов пограничного слоя в

форме критериев подобия, полученное в работах [2,3], имеет вид

$$\frac{dR^{**}}{dX} + C_1 \frac{R^{**}}{W_0} \frac{dW_0}{dX} = \frac{c_{f1}}{2} (1 + b_1) R_s W_0, \quad (1)$$

где
$$W_0 = \frac{w_0}{w_s}, \quad X = \frac{x}{s}, \quad C_1 = 1 + \frac{d^*}{d^{**}} - \frac{d}{d^{**}}, \quad (2)$$

$$d^* = \int_0^d \left(1 - \frac{rw}{r_0 w_0} \right) dy, \quad d^{**} = \int_0^d \frac{rw}{r_0 w_0} \left(1 - \frac{rw}{r_0 w_0} \right) dy, \quad b_1 = \frac{j_w}{r_0 w_0 c_{f1}} \quad (3)$$

Здесь d^* , d^{**} - толщина вытеснения и толщина потери импульса пограничного слоя соответственно, c_{f1} - локальный коэффициент трения, рассчитанный по максимальной скорости в рассматриваемом сечении, b_1 - параметр проницаемости стенки, C_1 - формпараметр, определяемый с учётом поперечного потока вещества и неизотермичности.

Вязкость газа на внешней границе пристенного пограничного слоя в общем случае может изменяться. В интегральном соотношении (1) при переходе к безразмерным величинам удобно воспользоваться постоянным значением вязкости, так как она входит под знак дифференциала. Поэтому в рассматриваемом случае использовалась вязкость газа в щели. Соответственно определяются числа Рейнольдса, построенные по толщине потери импульса и щели

$$R^{**} = \frac{r_0 w_0 d^{**}}{m_s}, \quad R_s = \frac{r_s w_s s}{m_s}$$

В затопленной струе, распространяющейся в пространстве, заполненном газом той же плотности, максимальная скорость изменяется по степенному закону [2,4,8]

$$W_0 = C_2 X^a \quad (4)$$

Закон трения в пристенном пограничном слое был принят в форме характерной для обтекаемых поверхностей [3]

$$\frac{c_{f1}}{2} = AR^{**m} \left(\frac{m_w}{m_s} \right)^m \Psi, \quad \Psi = \left(\frac{c_{f1}}{c_{f0}} \right)_{R^{**}} = \left(\frac{St_1}{St_0} \right)_{R_T^{**}} \quad (5)$$

Здесь m_w – динамическая вязкость на стенке, $A = 0.0128$, $m = 0.25$ (для чисел Рейнольдса $R^{**} < 10^4$), Ψ - предельный относительный закон, который имеет в [2] вид:

$$\Psi = \frac{4}{b_1(y_1 - 1)} \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{b_1}{(y_1 - 1)(b_1 + 1)} \right]^{1/2} - \operatorname{arctg} \left[\frac{b_1 y_1}{y_1 - 1} \right]^{1/2} \right\}^2, \quad \left(y_1 = \frac{i_w}{i_0} \right), \quad (6)$$

где фактор неизотермичности y_1 определяется по i_w и i_0 – полным энтальпиям газа на стенке и на внешней границе пристенного пограничного слоя.

Параметр проницаемости b_1 выражается через приведённые весовые концентрации химических элементов, вступающих в реакцию [3,4]. Приведённая концентрация - концентрация рассматриваемого химического элемента независимо от того, в каком состоянии он находится (свободный или в химическом соединении).

Так как в случае взаимодействия графита с кислородом, содержащимся в потоке газа, когда на стенке ($T_w \geq 1500 K$) идёт химическая реакция



параметр проницаемости стенки, определяется соотношением [3,4]:

$$b_1 = \frac{K(C)_w}{K(O)_w} K(O)_o = \frac{3}{4} K(O)_o = 0,173 \quad (8)$$

Значение формпараметра C_1 для неизотермических условий, которое используется в уравнении (1), может быть найдено по толщине вытеснения d^* и толщине потери импульса d^{**} вида (3), если представить

$$\frac{d^*}{d} = \int_0^1 \left(1 - \frac{r}{r_0} w \right) dh, \quad \frac{d^{**}}{d} = \int_0^1 \frac{r}{r_0} w(1-w) dh, \quad (9)$$

где $w = w_x/w_0$, $h = y/d$.

Распределение плотностей по сечению пограничного слоя находится из уравнения состояния идеального газа и условия подобия профилей скоростей и температур в пристенном пограничном слое [3]

$$\frac{r_0}{r} = y + (1-y)w, \quad y = \frac{T_w}{T_0} \quad (10)$$

Принимая $w = h^{1/7}$ и интегрируя выражения (9) с учётом (10) получаем зависимости вида

$$\frac{d^*}{d} = 1 - 7 \left[\frac{y^7}{(1-y)^8} \ln y + \sum_{n=0}^6 \frac{(-1)^n y^n}{(7-n)(1-y)^{n+1}} \right], \quad (11)$$

$$\frac{d^{**}}{d} = 7 \left[\frac{y^7}{(1-y)^9} \ln y + \frac{y^7}{(1-y)^8} + \sum_{n=0}^6 \frac{(-1)^n y^n}{(7-n)(8-n)(1-y)^{n+1}} \right], \quad (12)$$

что позволяет получить обобщение на случай энтальпийного фактора в однородных газовых потоках.

Для анализа влияния массообмена на проницаемой стенке на интегральные характеристики пограничного слоя воспользуемся профилем скорости, полученном для этого случая в работе [5] при $r = const$

$$w = 1 - \sqrt{\Psi + b}(1 - w_0) + b(1 - w_0)^2 / 4 \quad (13)$$

Здесь $w_0 = h^{1/7}$ - распределение скоростей в изотермическом пограничном слое на непроницаемой пластине. В этом случае относительный закон тепломассообмена и трения, учитывающий поперечный поток вещества, например, вследствие эрозии поверхности или вдува газа, по [3]

$$\Psi = (1 - b/4)^2, \quad b = b_1 \Psi = \frac{j_w}{r_0 w_0 c_{f_0}} \quad (14)$$

Тогда из соотношений (9), с учётом (13) и (14), находим зависимость интегральных характеристик пограничного слоя от вдува вида

$$\frac{d^*}{d} = \frac{1}{8} \left(\sqrt{\Psi + b} - \frac{b}{18} \right) \quad (16)$$

$$\frac{d^{**}}{d} = \frac{1}{8} \left(\sqrt{\Psi + b} - \frac{b}{18} \right) - \frac{1}{36} (\Psi + b) + \frac{1}{240} \sqrt{\Psi + b} - \frac{b^2}{5280} \quad (15)$$

На рис.2 приведены две кривые изменения формпараметра C_1 от возмущающих факторов. Кривая 1 показывает влияние фактора неизотермичности ψ (при $b = 0$). Кривая 2 - определяет влияние параметра проницаемости b (при $\psi = 1$). Расчёт проведён по формулам (11) – (15).

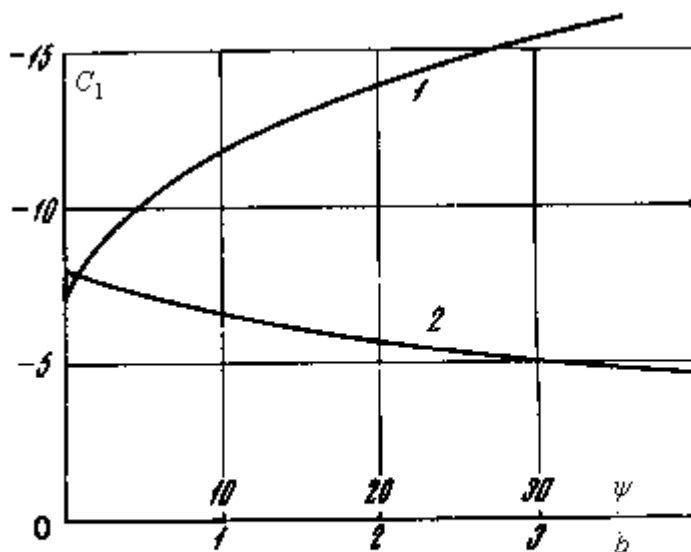


Рис.2. Влияние на формпараметр C_1 факторов неизотермичности ψ и поперечного потока вещества b

Интегральное соотношение импульсов (1) совместно с законом трения (5) представляет собой линейное дифференциальное уравнение. Его решение, используемое на основном участке струйного течения ($X \geq X_0$), при $b = const$ и при постоянной температуре стенки, имеет вид

$$R^{**} = \left[\frac{A(m+1)C_2 X^{a+1} \left(\frac{m_w}{m_s} \right)^m R_s \Psi(1+b_1)}{aC_1(m+1) + a + 1} \right]^{1/(m+1)} \quad (16)$$

Подставив выражение (16) в закон трения (5) и, используя соотношение $St_1 = (c_{f1}/2)P^{-0.6}$, получим выражение для коэффициента теплообмена

$$St_1 = \frac{A[aC_1(m+1) + a + 1]^n}{[A(m+1)R_s(b_1 + 1)C_2 X^{a+1}]^n P^{0.6}} \left(\frac{m_w}{m_s} \right)^n \Psi^{-(m+1)}, \quad n = \frac{m}{m+1}. \quad (17)$$

Для практических расчётов удобнее пользоваться числом Стэнтона, которое определяется по контролируемым параметрам газа в щели, в начале струйного течения. В этом случае

$$St_2 = \frac{j_w}{r_s w_s b_1} = St_1 W_0 = St_1 C_2 X^a \quad (18)$$

2. Экспериментальное исследование теплообмена. Опыты проводились на установке с индукционным нагревом графитового канала [3,4,5,6,7]. В качестве рабочих участков использовались цилиндрические каналы с внутренним диаметром 41 мм, наружным – 60 мм и длиной 190 мм. Они изготавливались из графита, плотность которого была

$$\rho = 1895 \text{ кг/м}^3.$$

Струя воздуха подавалась через кольцевую тангенциальную щель шириной $s = 2,08 \text{ мм}$, образованную соосно установленными входными соплами. Из окружающего пространства воздух подсасывался в канал через внутреннее сопло. Далее газ из канала истекал в атмосферу. Расход воздуха, подаваемого в щель, измерялся с помощью ротаметров. Температура воздуха во всех опытах практически не изменялась и составляла $T \approx 290 \text{ К}$.

Предварительные исследования динамики потока в изотермических условиях показали хорошее соответствие закономерности изменения максимальной скорости пристенной струи по длине канала данным работы [8]

$$W_0 = 3.6 \cdot X^{-0.45}, \quad (19)$$

полученной для плоского течения в диапазоне изменения относительной скорости вдува $3 < w_s / w_\infty < 9$. По-видимому, в рассматриваемом случае (при $s/D_0 = 0.0508$ и $x/D_0 \leq 5$) поперечная кривизна не оказывает существенного влияния на характеристики пристенной струи и течение в ней подобно плоскому.

Далее проводилось исследование теплообмена в пристенной струе воздуха на химически реагирующей поверхности в цилиндрическом графитовом канале. В этом случае графитовый образец разогревался с помощью индуктора высокочастотной установки до температуры $T_w = 1900 \div 2000$ К. Это обеспечивало практически постоянный энтальпийный фактор поверхности: $8,3 \leq \gamma_1 \leq 8,7$. Температура графитовой стенки измерялась оптическим пирометром ОППИР-017. Неравномерность распределения температуры стенки по длине от 30 до 170 мм не превышала 6%. При температуре стенки $T_w > 1500$ К образования окиси углерода происходит в диффузионной области. Во время разогрева графитового канала до рабочей температуры, а также во время охлаждения в конце опыта через щель в канал подавался нейтральный газ (азот или аргон), а внутреннее входное сопло плотно закрывалось профилированной вставкой. Это делалось для того, чтобы исключить возможную эрозию поверхности во время разогрева и охлаждения. Когда образец разогревался до заданной температуры, вставка из сопла убиралась, и вместо нейтрального газа в щель подавался воздух.

За время опыта (80-200 сек) унос графита составлял 1-2 мм на сторону. После опыта образец разрезался на цилиндрические секции шириной 10 мм. Толщина выгорания определялась по измерениям начального и конечного внутреннего диаметра. Измерения конечного внутреннего диаметра выполнялись на компараторе с ценой деления 1 мкм.

Массовый поток вещества на стенке определялся из соотношения

$$j_w = \frac{d \cdot r_c}{t} = \frac{(D^* - D_0) r_c}{t} . \quad (20)$$

Здесь d - толщина унесённого слоя графита, r_c - плотность графита, t - время эрозии в опыте, D^* - конечный диаметр, D_0 - начальный диаметр канала.

Экспериментальные значения критерия Стэнтона рассчитывались по формуле, учитывающей интенсивность эрозии стенки канала,

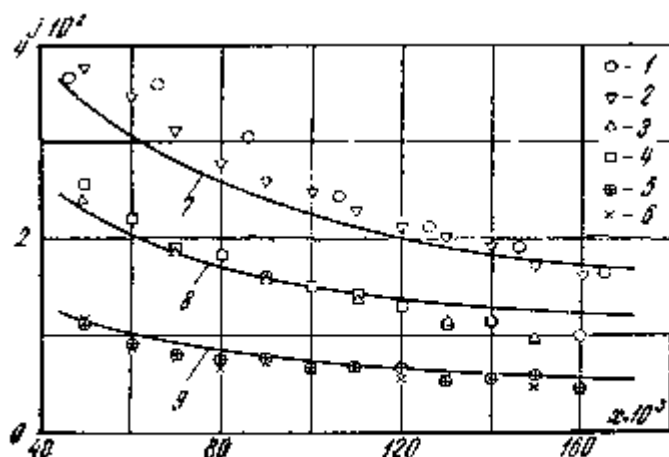
$$St_2 = \frac{j_w}{r_s w_s b_1},$$

где значения параметра $b_1 = 0,173$ в соответствии с (8) и работами [2,4,6].

Для того чтобы провести расчёт по формулам (17) и (18), необходимо знать закон изменения максимальной скорости и значение формпараметра c_1 . В условиях проведения экспериментов параметр проницаемости был мал $b = b_1 \Psi < 0.1$. Поэтому значение формпараметра $c_1 \approx -11$, которое найдено из соотношения (2) с учётом выражений (11) и (12) в зависимости от фактора неизотермичности (в соответствии с рис.2.). Тогда, используя рассчитанное значение c_1 и закон изменения максимальной скорости (19), из уравнений (17) и (18) определяется зависимость

$$St_2 R_s^{0.2} = \frac{0.12}{X^{0.56} P^{0.6}} \left(\frac{m_w}{m_s} \right)^{0.2} \Psi^{0.8}. \quad (21)$$

В этом случае относительный коэффициент теплообмена Ψ определяется по формуле (6) и принимается то, что числа Прандля P и Шмидта Sc равны, вследствие аналогии в газовом потоке процессов теплопроводности и диффузии. На рисунке 3 представлена зависимость интенсивности эрозии $j_w \cdot 10^2 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ графита по длине канала $x \cdot 10^3 \text{ м}$ в затопленной пристенной струе воздуха для трёх различных скоростей в щели.



<http://ej.kubag> Рис.3. Интенсивность химической эрозии стенки канала по длине обтекаемой поверхности

На всех режимах было проведено по два опыта. Численные значения параметров для указанных точек приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения скорости воздушной струи в щели и температура стенки

точки	1	2	3	4	5	6
$w_s, м/с$	114	113,4	59,6	72,7	27,4	25,95
T_w, K	1923	1928	1938	1988	1997	1959

Кривые 7, 8, 9 на рис. 3 – расчёт выполненный по формуле (22), полученной в результате преобразований выражений (18), (19) и (21)

$$j_w = \frac{0.12b_1 r_s w_s}{X^{0.56} R_s^{0.2} P^{0.6}} \left(\frac{m_w}{m_s} \right)^{0.2} \Psi^{0.8} \quad (22)$$

при скоростях в щели соответственно 114; 66; 26,7 м/с.

Эти же опытные данные для наглядности приведены на рис. 4 в логарифмических координатах. Как видно, при такой обработке они хорошо обобщаются. Обозначения опытных точек 1, 2, 3, 4, 5, 6 те же, что и на рис. 3. Сплошная линия – расчёт по формуле (21) при $y_1 = 8$. Для сравнения приведена расчётная линия в изотермических условиях при $y_1 = 1$. Видно, что неизотермичность в рассматриваемом случае уменьшает интенсивность тепломассообмена более чем в два раза по сравнению с квазиизотермическим обтеканием работы [3].

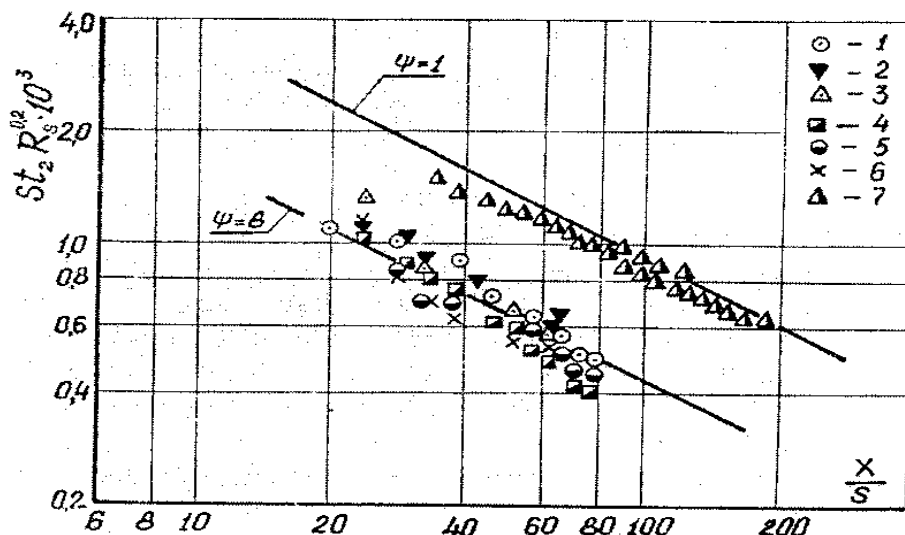


Рис.4 Влияние неизотермичности ($\psi > 1$) на коэффициент теплообмена в пристенной затопленной струе

На рисунке также приведена оценка влияния неизотермичности в условиях сублимации поверхности сухого льда (точки 7) по данным [9], проведённая при энтальпийном факторе $y_1 = 1,3$ для диффузионной области теплообмена на стенке.

Таким образом, на основании вышеприведённых исследований можно рассчитать коэффициент теплообмена St_2 в пристенной затопленной струе газа по длине обтекаемой поверхности для неизотермических условий с учётом поперечного потока вещества на стенке j_w , определить толщину унесённого слоя и, соответственно, изменение толщины стенки канала для заданного интервала времени при различной интенсивности массового потока газа на входе.

Литература

1. Трухачев В. И. Развитие науки – путь к успеху! // Достижения науки и техники АПК. 2010. № 9. С. 3–4.
2. Волчков Э. П., Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Взаимодействие затопленной пристенной струи с твёрдой стенкой // Журнал прикладной механики и технической физики. 1965. № 2. С. 150–153.
3. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. – Новосибирск: СО АН СССР, 1972. 344 с.

4. Волчков Э. П., Никитин П. В. Турбулентная затопленная пристенная струя воздуха на выгорающей графитовой поверхности // Журнал прикладной механики и технической физики. 1971. № 1. С. 60–67.

5. Пристенная турбулентность / под. ред. С. С. Кутателадзе. – Новосибирск: СО АН СССР, 1968. 230 с.

6. Никитин П. В., Хащенко А. А. Особенности турбулентного теплообмена на пористой поверхности // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе: Сборник научных работ; Став. гос. агр. ун-т, Ставрополь, 2011. С. 103–107.

7. Никитин П. В., Хащенко А. А., Стародубцева Г.П. Термогазодинамические эффекты, влияющие на теплообмена на пористой поверхности // Моделирование производственных процессов и развитие информационных систем: Сборник научных работ; Став. гос. агр. ун-т, Ставрополь, 2012. с. 204-207.

8. Seban R. A., Back L. H. Velocity and temperature profiles in a wall jet // Internat. J. Heat and Mass Trans. 1961. Vol. 3, No. 4. P. 673–684.

9. Пименова Т. Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. 208 с.