

ТЕПЛОПЕРЕНОС В СИСТЕМЕ ПОРИСТОГО ПРОНИКАЮЩЕГО ОХЛАЖДЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

На основе численного эксперимента проанализированы поля температуры в ламинарном пограничном слое, пористой стенке и полости подвода охлаждающего газа, а также теплоотдача к пограничному слою при различных интенсивностях вдува. Показано, что теплоотдача между пористой стенкой конечной толщины и потоком высокотемпературного газа существенно отличается от теплоотдачи в случае задания той же интенсивности вдува и однородного теплового граничного условия непосредственно на обтекаемой стенке. Одной из причин этого является формирование переменной вдоль пограничного слоя температуры стенки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Выполнено исследование теплопереноса в модели полной технической системы реализации пористого проникающего охлаждения (рис.1, *ABCD*), включающей область потока высокотемпературного газа с пограничным слоем на обтекаемой поверхности (*Rd*), область подвода охлаждающего газа (*Ru*) и расположенную между ними пористую оболочку (*H*). Такая постановка задачи вносит ряд серьезных уточнений в имеющиеся подходы к расчету теплообмена при вдуве. В основном это связано с постановкой граничных условий. Традиционным для задач со вдувом является задание теплового граничного условия и интенсивности вдува на поверхности "*W*" (рис.1).

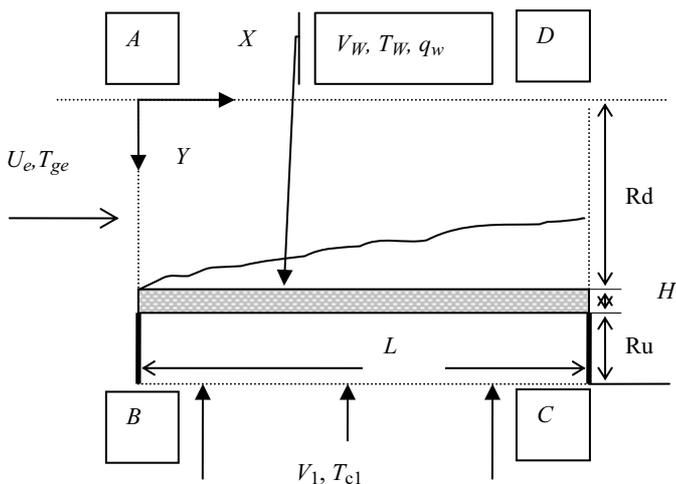


Рис.1. Схема рассматриваемой задачи

В последнее время в некоторых работах рассматривается задача с заданием граничных условий на противоположной поверхности пористой стенки (*Rd + H*). Однако задание здесь теплового гранич-

ного условия даже третьего рода практически не изменяет результата, поскольку задаются условия непосредственно на стенке и не учитываются медленные течения охлаждающего газа (в частности, интенсивный теплоперенос за счет теплопроводности вдоль потока газа-охлаждителя навстречу его течения). Такая постановка задачи не соответствует технической реализации пористого проникающего охлаждения

В нашей постановке начальные параметры охлаждающего газа задаются на входе в камеру его подвода к пористой оболочке (рис.1, линия *BC*).

В работе [1] показано, что при формировании переменной температуры пористой стенки вдоль потока высокотемпературного газа в случае однородного подвода охлаждающего газа (рис.1) геометрические и теплофизические свойства пористой матрицы оказывают существенное влияние на теплоотдачу. Данные, приведенные в статье [1], относятся к одному значению интенсивности вдува и постоянным теплофизическим свойствам.

В настоящей работе продолжено исследование [1] для всего диапазона интенсивностей вдува от ее нулевого значения до предельного значения — оттеснения пограничного слоя при переменных теплофизических свойствах однородного газа.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис.1 показана схема рассматриваемой задачи и приведены обозначения основных параметров. Расчетные параметры соответствуют следующим значениям: $u_e = 20$ м/с, $T_{ge} = 1500$ К, $T_{c1} = 600$ К, $p = 1.5$ МПа, $Rd = 0.03$ м, $Ru = 3$ мм, $H = 3$ мм, $L = 0.2$ м, $\Pi = 0.3 - 0.5$, $d_s = 0.2$ мм.

Рассматриваются ламинарный пограничный слой в потоке воздуха, $Re_L = (\bar{\rho}u)_e L / \mu_e = 2.5 \cdot 10^5$ и три варианта для материала пористой стенки: нержавеющая сталь ($\lambda_s = 15$ Вт/(м·К)), медь ($\lambda_s = 300$ Вт/(м·К)), предельно нетеплопроводный материал ($\lambda_s \rightarrow 0$). Охлаждающим газом так же является воздух.

Теплофизические свойства воздуха в диапазоне температур 600–1500 К при давлении $p = 1.5$ МПа в соответствии с [2] задаются в следующем виде: $c_p = \bar{c}_p = 1.1$ кДж/(кг·К), $Pr = 0.71$, $T_+ = 273$ К, $\rho_+ = 19.2$ кг/м³,

$$\rho = \rho_+ T_+ / T \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad \nu = 10^{-10} T^{1.64} \text{ (м}^2\text{/с)}. \quad (1)$$

Численное решение выполнено с использованием программно-вычислительного комплекса ANES/NE, разработанного на кафедре инженерной теплофизики МЭИ (ТУ). Описание этой программы для решения задач сопряженного теплообмена дано в работах [1], [3].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ

На рис.2а приведены данные по плотности теплового потока $q_w = \lambda_g \frac{\partial t_g}{\partial y} \Big|_{y=Rd-}$ к стенке в средней части обтекаемой пористой пластины ($X = L/2$) в зависимости от интенсивности подачи охлаждающего газа $\bar{j} = (\bar{\rho v})_{cl} / (\bar{\rho u})_{ge}$. Здесь остановимся на некоторых пояснениях. Поскольку граничные условия для охлаждающего газа задаются не на поверхности "w", как это делается традиционно, а на поверхности "BC", то при учете переменности физических свойств газа мы говорим не о среднemasсовой скорости вдува $(\bar{\rho v})_w$, а о среднemasсовой скорости подачи охлаждающего газа $(\bar{\rho v})_{cl}$ и, следовательно, о интенсивности подачи охлаждающего газа. Для условий подачи охлаждающего газа в соответствии с показанной на рис.1 схемой для теплового потока соблюдается следующий баланс

$$q_w = \bar{c}_p ((\bar{\rho v T})_{wc} - (\bar{\rho v T})_{cl}). \quad (2)$$

Уравнение (2) отражает то, что вся теплота, подводимая к пористой стенке, возвращается в пограничный слой высокотемпературного газа с газом охладителем с повышенной энтальпией по сравнению с начальной его энтальпией (i_{cl}). При этом температура стенки с увеличением интенсивности подвода охлаждающего газа, естественно, существенно уменьшается (рис.2б).

На рис.2 показано изменение тепловых параметров на поверхности пористой стенки в зависимости от интенсивности подвода охлаждающего газа в диапазоне от нулевого его значения до предельного при условии отрыва пограничного слоя. Характер изменения $q_w(j)$ соответствует зависимости (2). При этом наблюдается существенное различие в величине плотности теплового потока для различных материалов пористой стенки. Последнее связано с формированием переменной температуры стенки вдоль потока высокотемпературного газа [1]. Наибольшее различие теплового потока к стенке из нержавеющей стали и к стенке из меди имеет место в диапазоне относительных интенсивностей подачи охлаждающего газа $\bar{j} = 0.0015 - 0.0035$.

Кроме основных результатов расчета (точки 1,2,3) на рис. 2а представлены различные варианты аппроксимации данных, полученных для реального изменения теплофизических свойств газа, посредством введения параметров для предположения о постоянстве свойств. Все эти варианты относятся к режиму, представленному точками 1. Для модели-

рования физического эксперимента при постоянных физических свойствах, сохраняя все остальные параметры теми же, задаем температуру натекающего на пластину «высокотемпературного» газа равной 700К (точки 4).

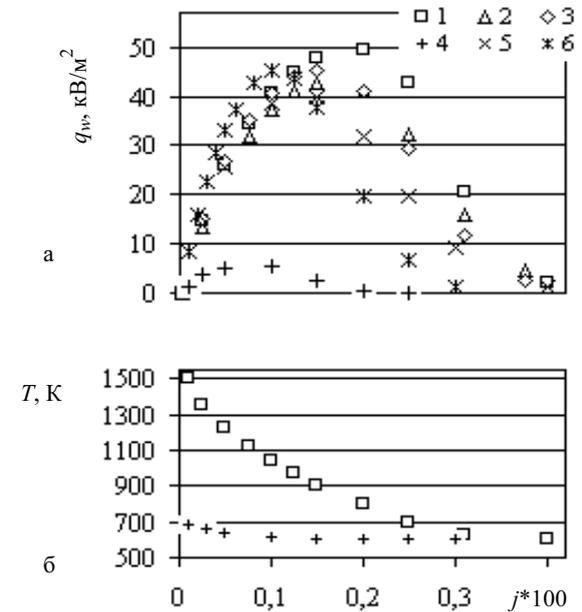


Рис. 2. Изменение плотности теплового потока к стенке (а) и температуры стенки (б) в зависимости от относительной интенсивности подачи охлаждающего газа при $Re_x = 1.25 \cdot 10^5$ и различных материалах каркаса стенки: 1,5 – нержавеющая сталь; 2 – медь; 3 – предельно нетеплопроводный материал; 4 – нерж. сталь, $T_{ge} = 700$ К, $Re_x = 4.4 \cdot 10^5$; 5 – $T_* = T_{ge} = 1500$ К; 6 – нержавеющая сталь, $T_* = (T_{ge} + T_{cl})/2 = 1050$ К, $Re_x = 2.3 \cdot 10^5$

Если в качестве характерной температуры T_* , при которой выбираются теплофизические свойства газа, принять максимальную температуру T_{ge} (точки 5), то при относительно малых интенсивностях вдува $\bar{j} = v_w / u_e < 0.001$ (при постоянных теплофизических свойствах газа $(\bar{\rho v})_{cl} = \rho v_w$) плотности теплового потока к стенке практически остаются теми же, что и при переменных физических свойствах газа. При более высоких значениях j расхождения превышают двукратные значения. Попытка улучшить согласование данных за счет принятия в качестве характерной температуры среднюю температуру $T_* = (T_{ge} + T_{cl})/2 = 1050$ К не привела к желаемому результату (точки 6). Конечно, при этом необходимо иметь в виду, что для вариантов 4 и 6 числа Рейнольдса отличаются от значения Re_x для исходного варианта 1.

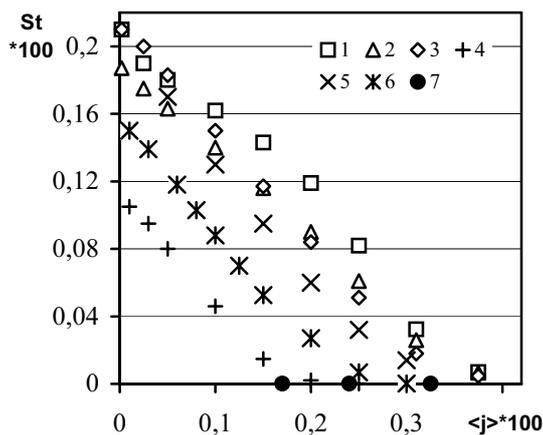


Рис.3. Изменение числа Стантона в зависимости от интенсивности подачи охлаждающего газа. 1,2,3,4,5,6 – то же, что и на рис.2; 7 – значения критической интенсивности вдува, рассчитанные по (3)

Данные, приведенные на рис. 2, на рис. 3 представлены в виде безразмерного коэффициента теплоотдачи, числа Стантона. Наблюдается существенное изменение чисел St (точки 1, 2, 3) в зависимости от теплофизических свойств материала каркаса пористой стенки (влияние теплопроводности).

Величину критической относительной интенсивности вдува \bar{j}^* , при которой происходит отрыв ламинарного пограничного слоя, для рассматриваемых случаев определим из соотношений, приведенных в [4]. Итак, при $j_w = \text{const}$ величины \bar{j}^* найдем из следующих данных для критического параметра проницаемости:

$$b_{cr} = 3.35 = \frac{2\bar{j}^*}{c f_0} = \frac{2\bar{j}^* \sqrt{Re_x}}{0.686}. \quad (3)$$

Вычисленные по (3) величины \bar{j}^* приведены на рис.3 (точки 7 последовательно для $Re_x = (4.4; 2.3; 1.25) \cdot 10^5$). Они согласуются с результатами наших расчетов теплоотдачи для постоянных физических свойств (точки 4, 6, 5 соответственно). На рис.4 эти же данные представлены в зависимости от теплового параметра проницаемости b_T . При расчете b_T использовано значение

$$St_0 = 0.332 / (\sqrt{Re_x} Pr^{2/3}), \quad (4)$$

справедливое при $T_w = \text{const}$ и $j = 0$ для ламинарного пограничного слоя на гладкой поверхности. Полученное таким образом значение критического теплового параметра проницаемости равно $b_{Tcr} = 2.74$. Для вариантов с постоянными физическими свойствами значения St_0 , рассчитанные по (4) так же показаны на рис.4 (точки 9).

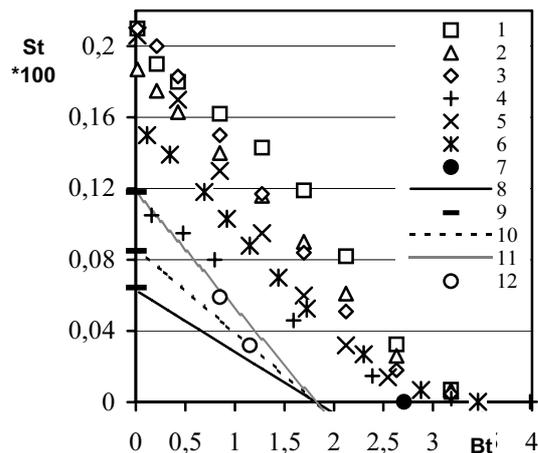


Рис.4. Изменение числа Стантона в зависимости от теплового параметра проницаемости. Обозначения 1...7 те же, что и на рис. 3. 9 – расчет по (4). 8, 10, 11 – расчет по (5) для чисел Рейнольдса равных $4,4 \cdot 10^5$; $2,3 \cdot 10^5$; $1,25 \cdot 10^5$ соответственно; 12 – расчет для $\bar{j} = 0.001$ и соответствующих значений Re_x

Результаты расчетных и аналитических исследований по теплообмену в ламинарном пограничном слое со вдувом при $T_w = \text{const}$, приведенные в [5], обобщаются следующей зависимостью

$$St = St_0 \left(1 - \frac{b_T}{1.86}\right). \quad (5)$$

На рис. 4 линиями показаны расчеты по зависимости (5) при различных числах Рейнольдса. Точками около линий иллюстрируется соответствие наших расчетов зависимости (5). Значительно полное хорошее согласование наших контрольных расчетов с зависимостью (5) представлено в [1].

Приведенные на рис.4 данные демонстрируют принципиальное различие результатов при задании граничных условий для охлаждающего газа непосредственно на «охлаждаемой поверхности» W (рис.1) или на его входе в полость подвода к пористой стенке (граница BC , рис.1).

Данные 8...12 на рис.4 и зависимости (4), (5) относятся к заданию граничных условий на поверхности W при постоянных физических свойствах газа. Эти результаты получены при аналитических и численных исследованиях теплообмена в ламинарном пограничном слое со вдувом, что подтверждают и наши численные решения.

Данные 1...8 на рис.4 относятся к заданию граничных условий для охлаждающего газа на границе BC . В этом случае температура на обтекаемой высокотемпературным газом пористой стенке не задается. Она формируется в зависимости от параметров пористой стенки, что обсуждалось выше. Результаты нашего численного эксперимента в такой постановке более соответствуют физическому экспери-

менту. По-видимому, можно считать, что о последнем свидетельствуют, в частности, данные по отрыву пограничного слоя, а именно точки 7 на рис. 3 и 4 и зависимость (3).

Проведем дополнительное сопоставление данных при переменных физических свойствах и при задании дополнительного теплового условия. На рис.5 представлена часть рассмотренных выше результатов. Результаты расчетов для переменных физических свойств газа при обтекании поверхности со вдувом (точки 6) показывают малое влияние на теплоотдачу переменных физических свойств при охлаждении с температурным фактором $T_w/T_e = 600/1500 = 0.4$, что соответствует литературным данным. В то же время при обтекании пористой стенки расхождение между результатами для переменных и постоянных свойств является весьма существенным в условиях вдува (точки 1,2 соответственно). Если на пористую стенку наложить искусственное дополнительное условие $T_s = \text{const}$ (точки 7), то соотношение между данными для постоянных и переменных свойств становится такими же, как и при обтекании поверхности (сравним данные 2,7 и 4,6 соответственно).

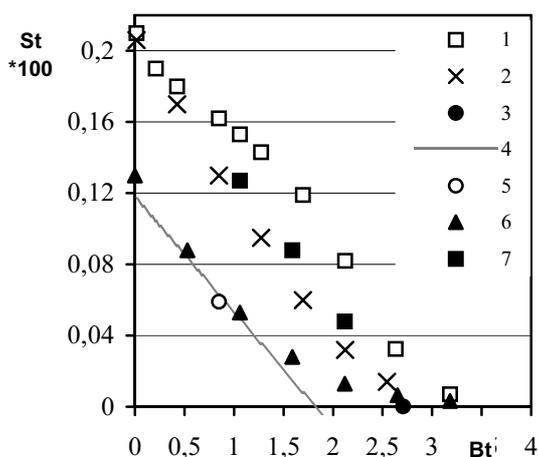


Рис.5. Сопоставление данных по теплоотдаче на поверхности и на пористой стенке конечной толщины при $Re = 1.25 \cdot 10^5 : 1 \dots 5$ – для тех же режимов, которые обозначены на рис.4 аналогичными символами; 6 – результаты расчетов для поверхности при переменных физических свойствах; 7 – результаты расчетов для пористой стенки при переменных физических свойствах и задании дополнительного условия $T_s = 600 \text{ K}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке систем проникающего охлаждения, при постановке экспериментальных исследований и анализе их результатов необходимо иметь в виду рассмотренные в данной работе особенности получения данных по теплоотдаче.

Использование зависимостей для расчета теплоотдачи, полученных при задании вдува и теплового граничного условия непосредственно на границе ламинарного пограничного слоя с обтекаемой поверхностью, для расчета теплопередачи к пористой проницаемой стенке конечной толщины может привести к существенным ошибкам.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 05-08-18139-а).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$u_x \equiv u, u_y \equiv v$ – компоненты скорости, м/с;

$j = (\rho v)_w$ – интенсивность вдува (массовая скорость вдува), кг/(м²·с);

$b = 2\bar{j}/c f_0$ – параметр проницаемости;

$B_T \equiv Bt = \bar{j}/St_0$ – тепловой параметр проницаемости;

$\bar{j} \equiv \langle j \rangle = (\rho v)_w / (\rho u)_e$ – относительная интенсивность вдува;

$Re_x = (\rho u)_{ge} x / \nu_{ge}$ – числа Рейнольдса;

$St = q_w / [c_p (\rho u)_e (T_{ge} - T_w)]$ – число Стантона.

Индексы:

c – относится к газу-охладителю;

e – относится к сечению входа высокотемпературного газа при $x = 0$;

g – относится к высокотемпературному газу;

s – относится к твердой матрице пористой стенки;

w – относится к поверхности стенки, обтекаемой высокотемпературным газом, при $y = Rd$;

0 – относится к условиям при отсутствии вдува;

1 – относится к сечению входа охлаждающего газа при $y = Rd + H + Ru$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А.И., Поляков А.Ф. Тепловое состояние пористой стенки при проникающем охлаждении // ТВТ. 2006. Т.44. №1.
2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972. 720с.
3. Артёмов В.И., Леонтьев А.И., Поляков А.Ф. Численное моделирование конвективно-кондуктивного теплообмена в блоке прямоугольных микроканалов // ТВТ. 2005. Т.43. №4.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
5. Петухов Б.С. Теплообмен в движущейся однофазной среде. Ламинарный пограничный слой. М.: Изд-во МЭИ, 1993. 350с.