

ЗАКОН ТЕПЛООБМЕНА В ОБЛАСТИ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ

Ю. В. БАРЫШЕВ, А. И. ЛЕОНТЬЕВ, Н. К. ПЕЙКЕР

(Москва)

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена в области газовой завесы за проникаемым участком поверхности в дозвуковом турбулентном пограничном слое в диапазоне интенсивности вдувания $j=0.001\div 0.04$.

В настоящее время газовая завеса рассматривается как один из перспективных методов теплозащиты отдельных теплонапряженных участков конструкции. Охлаждающий газ может подводиться как через тангенциальную щель, так и через пористый участок поверхности.

При расчете теплоотдачи в области газовой завесы предполагается [1], что закон теплообмена

$$(1) \quad St_0 = 0.0128 Re_T^{** - 0.25} Pr^{-0.75}$$

справедлив в этих условиях, если коэффициент теплоотдачи α определяется по разности между действительной температурой стенки T_w и температурой в адиабатических условиях T_{wa}

$$(2) \quad \alpha = q_w (T_w - T_{wa})^{-1}$$

где q_w — плотность теплового потока.

Результаты экспериментов показывают, что таким образом можно рассчитывать теплообмен на значительном расстоянии от щели [2-4] и за проникаемым участком вдува при малых интенсивностях вдувания $j = \rho_{w1} w_{w1} / \rho_0 w_0 \leq 0.0051$ [5]. (Здесь ρ_{w1} и w_{w1} — плотность и скорость вдуваемого газа на стенке, ρ_0 и w_0 — плотность и скорость потока вне пограничного слоя.)

В данной работе исследуется справедливость закона теплообмена на пластине за пористыми участками различной длины при интенсивностях вдува j до 0.04.

Эксперименты проводились в малой дозвуковой аэродинамической трубе Института механики МГУ. Воздух поступал от баллонной станции через регулятор давления и сопло с большим поджатием позволили получить достаточно низкую степень турбулентности основного потока (0.2÷0.3%). Рабочая часть представляет собой прямоугольный канал сечением 0.07×0.075 м² и длиной 0.6 м. Верхней стенкой служила модель, нижняя была гибкой и позволяла менять высоту рабочей части в зависимости от интенсивности вдувания так, чтобы статическое давление всегда оставалось постоянным по длине. Параметры основного потока не изменялись и составляли: скорость 50 м/сек, температура 290÷300° К, число Рейнольдса на 1 м $3.6 \cdot 10^6$. Измерения проводились при вдуве нагретого воздуха.

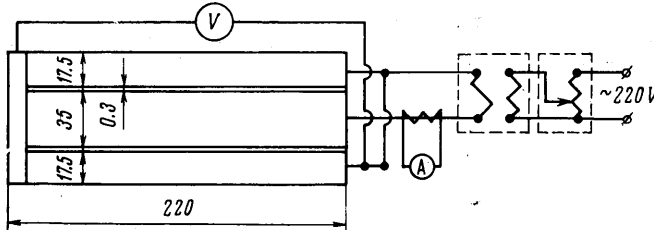
В экспериментах использовались проникаемые участки длиной 0.04 и 0.16 м. Пористая пластина была разделена на четыре секции равной длины, теплоизолированные одна от другой и имеющие отдельный подвод газа. Равномерность проникаемости контролировалась, и отклонение от среднего уровня не превышало ±3%.

Температура пористой стенки и вдуваемого воздуха под пластиной измерялись хромель-копелевыми термопарами с холодными спаями. Воздух к модели поступал от сети высокого давления через редуктор, мерную критическую шайбу и электрический нагреватель. Более подробное описание аналогичного проникаемого участка и системы подвода вдуваемого воздуха приводится в [6].

Для измерения температуры теплоизолированной стенки и величины локальных коэффициентов теплоотдачи в области газовой завесы был изготовлен экспериментальный участок (фиг. 1). На деревянную пластину наклеивались три ленточных нагревателя из нержавеющей стали толщиной 10^{-4} м, изолированные между собой продольными зазорами $3 \cdot 10^{-4}$ м. Их передние концы закреплялись точечной сваркой на поперечной стальной пластине. Каждая из двух боковых лент была в 2 раза уже средней. Они включались в электрическую цепь параллельно друг другу и последовательно со средней. Таким образом величина теплового потока, который рассчитывался по подведенной электрической мощности, была постоянна по всей поверхности пластины. Температура средней ленты измерялась хромель-копелевыми термопарами, закрепленными на нижней стороне нагревателя точечной сваркой. Электрическая мощность, идущая на нагрев измерительной части экспериментального участка, определялась по показаниям вольтметра и амперметра.

Измерения профилей скоростей и температур, а также распределения их пульсационных составляющих производились трубкой полного давления и термоанемометрической аппаратурой системы «DISA 55M».

На начальном этапе работы проводились измерения профилей скорости и температуры, а также распределения их пульсационных составляющих в пограничном слое на непроницаемой пластине при отсутствии газовой завесы. Были получены результаты, характерные для развитого турбулентного пограничного слоя. Результаты из-



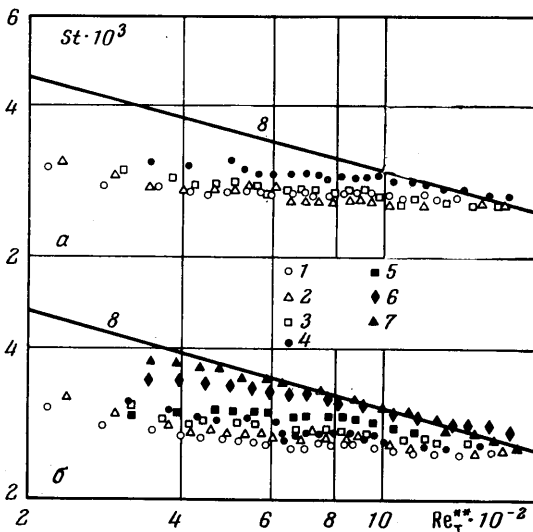
Фиг. 1

мерения теплоотдачи на нагреваемой пластине хорошо обобщаются зависимостью (1) с точностью $\pm 5\%$.

Эксперимент проводился следующим образом:

1) измерялась температура теплоизолированной стенки в области газовой завесы (напряжение на нагревателе не подавалось). 2) при неизменных условиях на пористом участке измерялась температура нагретой стенки при наличии газовой завесы (подавалось напряжение на нагревателе).

Результаты измерений температуры теплоизолированной стенки за участком вдувания длиной 0.04 сравнивались с измерениями других авторов [5, 7, 8] и теоретической зависимостью [1]. Получено вполне удовлетворительное совпадение.



Фиг. 2

На фиг. 2 представлены результаты измерения теплоотдачи в области газовой завесы для пористого участка длиной $x_1=0.04$ (а) и 0.16 м (б). (Здесь 1 — $j=0.04$, 2 — 0.03, 3 — 0.02, 4 — 0.01, 5 — 0.005; 6 — 0.003, 7 — 0.001, 8 — расчет по формуле (1)). Как указывалось выше, тепловой поток, температуры нагретой и теплоизолированной стенки определялись экспериментально. Величину безразмерного коэффициента теплоотдачи определяли по соотношению

$$(3) \quad St = q_w / C_p \rho_0 w_0 (T_w - T_{wa}), \quad q_w = q_k - q_r, \quad q_k = IU / F$$

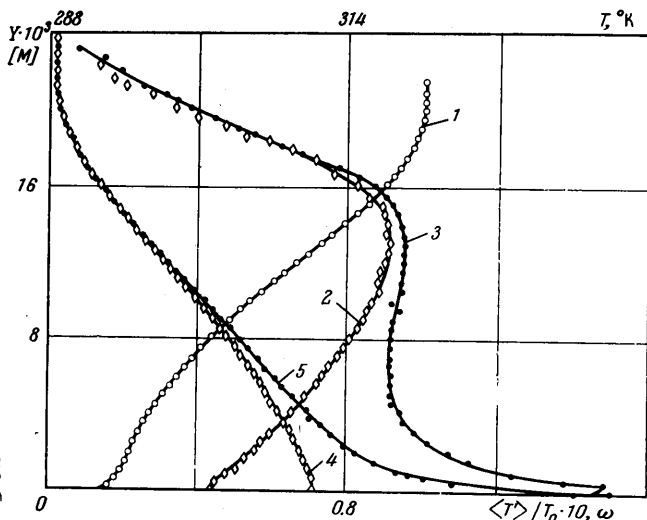
где q_k и q_r — плотность конвективного и радиационного тепловых потоков, I — ток, U — напряжение, F — площадь нагревателей, C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Число Рейнольдса, определенное по толщине потери энергии, рассчитывалось по методу локального моделирования [1] по формуле:

$$(4) \quad Re_T^{**} = \int_{x_1}^x q_w dx [\mu_w C_p (T_w - T_{wa})]^{-1}$$

где μ_w — динамическая вязкость.

На том же графике представлен закон теплообмена (1). Видно, что при малых интенсивностях вдува закон теплообмена хорошо выполняется в области газовой



Фиг. 3

завесы, т. е. подтверждаются выводы работы [5]. При интенсивном вдувании расхождение результатов расчета и экспериментальных данных может достигать 50%. Аналогичное явление авторы отмечали при сверхзвуковых скоростях основного потока [4].

На фиг. 3 представлены измерения в пограничном слое на теплоизолированной пластине и теплообменной в области газовой завесы за пронизываемым участком длиной $x_1 = 0.16$ м при интенсивности вдува 0.02. (Здесь 1 — $U/U_0 = f(y)$ — профиль температуры в пограничном слое на адиабатической пластине; 4 — $T = f(y)$ — профиль температуры на теплообменной пластине в области газовой завесы; 5 — $T = f(y)$ — профиль температуры на теплообменной пластине в области газовой завесы; 2 — $(T - T_a)/T_0 = f(y)$ — распределение пульсации адиабатической температуры; 3 — $(T - T_a)/T_0 = f(y)$ — распределение пульсации температуры в области газовой завесы при наличии теплообмена.) Из графика следует, что во внешней части пограничного слоя при наличии газовой завесы профили температур для адиабатической и теплообменной пластин подобны, при этом совпадают и распределения их пульсационных составляющих. У стенки развивается слой избыточной температуры $(T - T_a)$, который находится внутри динамического пограничного слоя. Измерения показывают (фиг. 4), что в области газовой завесы при наличии теплообмена хорошо выполняется равенство

$$(5) \quad \int_0^{\delta_T} C_p \rho w (T - T_a) dy \left[\int_{x_1}^x q_w dx \right]^{-1} = Q = 1$$

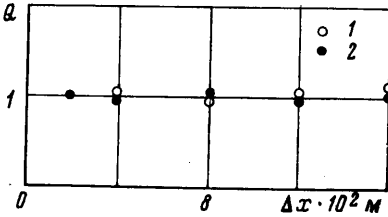
где δ_T — толщина теплового слоя избыточной температуры. (Здесь 1 — $x_1 = 0.04$ м; 2 — 0.16 м.) Исходя из этого интегральное соотношение энергии можно записать в виде

$$\frac{d Re_{Ta}^{**}}{dx^*} + \frac{Re_{Ta}^{**}}{\Delta T_{wa}} \frac{d(\Delta T_{wa})}{dx^*} = Re_{x1} St_a, \quad Re_{x1} = \frac{\rho_0 w_0 x_1}{\mu_0}$$

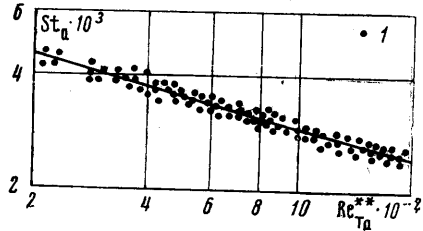
$$St_a = q_w / C_p \rho_0 w_{0T} (T_w - T_{wa}), \quad Re_{Ta} = \rho_0 w_{0T} \delta_{Ta}^{**} / \mu_0, \quad x^* = x / x_1$$

$$\Delta T_{wa} = T_w - T_{wa}, \quad \delta_{Ta}^{**} = \int_0^{\delta_T} \frac{\rho w}{\rho_0 w_{0T}} \left(\frac{T - T_a}{T_w - T_{wa}} \right) dy$$

где w_{0T} — скорость на границе слоя избыточной температуры, δ_{Ta}^{**} — толщина потери энергии слоя избыточной температуры. Величина w_{0T} определялась по измеренным



Фиг. 4



Фиг. 5

профилям скоростей и температур при условии $(T - T_a) / (T_w - T_{wa}) \leq 0.015$. Используя соотношение (5), находим, что $Re_{Ta}^{**} = Re_T^{**}$.

На фиг. 5 представлены результаты обработки опытных данных по конвективному теплообмену в области газовой завесы (точки 1) в виде зависимости критерия St_a от критерия Re_{Ta}^{**} . Как видно из фиг. 5 в принятой обработке опытные данные подтверждают закон теплообмена (4).

Авторы благодарят Г. А. Любимова за постоянное внимание и помощь в работе.

Поступила 22 VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., «Энергия», 1972.
2. Эккерт Э. Р. Пленочное охлаждение в газовой среде. Инж.-физ. ж., 1970, т. 19, № 3.
3. Wilson D. J., Goldstein R. J. Effect of film cooling injection on downstream heat transfer coefficients in high speed flow. Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer, 1973, vol. 95, No. 4.
4. Волчков Э. П., Левченко В. Я. Теплообмен при струйной защите поверхностей. ПМТФ, 1966, № 2.
5. Комаров В. П., Леонтьев А. И. Экспериментальное исследование эффективности завесы в турбулентном пограничном слое газа. Теплофизика высоких температур, 1970, т. 8, № 2.
6. Рождественский В. И., Барышев Ю. В., Пейкер Н. К. Исследование эффективности газовой завесы при наличии продольного градиента давления. Отчет Ин-та механ. МГУ, 1974, № 1526.
7. Nishiwaki N., Hirata M., Tsuchida A. Heat transfer on a surface covered by cold air film. In: Proc. Heat Transfer Conference. Univ. Colorado Boulder, Colorado USA, 1961, pt. 4. New York. N. Y., Amer. Soc. Mech. Engrs, 1963.
8. Голдстейн, Шейвиг, Чен. Эффективность пленочного охлаждения с вдувом через пористую стенку. Тр. Америк. о-ва инж.-механ. Сер. С, Теплопередача, 1965, т. 87, № 3.
9. Барышев Ю. В., Виноградов Ю. А., Леонтьев А. И., Рождественский В. И. Теплообмен на пористой поверхности в сверхзвуковом потоке. В сб. «Теплообмен», 1974. Советские исследования. М., «Наука», 1975.