

ТЕЧЕНИЕ ПРИ СТРУЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ПЛАСТИНЫ

В. В. ГЛАЗКОВ, М. Д. ГУСЕВА, Б. А. ЖЕСТКОВ

(Москва)

Изучению струйного (пленочного) охлаждения посвящено много работ. В работах, выполненных в начале 50-х годов, считалось, что основная часть зоны смешения двух газовых потоков подчиняется закономерностям распространения свободной турбулентной струи в спутном потоке, а небольшая ее часть, прилегающая к стенке, — закономерностям пограничного слоя. Были разработаны приближенные методики расчета течения, равновесных значений температур и коэффициентов теплообмена, позволяющие рассчитать температуру стенки в условиях сложного теплообмена. Результаты этих исследований частично освещены в [1-3]. В большинстве поздних работ, например в [4-9], в отличие от [1-3] предполагается, что при струйном охлаждении течение подчиняется закономерностям пограничного слоя. Во всех указанных выше работах отсутствуют систематические экспериментальные данные о течении в зоне смешения при скоростях в щели, заметно превышающих скорость основного потока. В этих случаях скорость газовой смеси вблизи границы пристеночного слоя достигает экстремума, что позволяет наглядно оценить относительную долю пограничного слоя в турбулентной зоне смешения.

Целью данной работы является описание и анализ опытных данных о распределении скоростей и температур в турбулентной зоне смешения двух воздушных потоков при отношении скорости в щели к скорости спутного потока $m = u_1/u_0 > 1$.

1. Схема течения и принятые допущения. Схематично картина течения изображена на фиг. 1. Стенка обтекается потоком горячего газа с параметрами u_0, T_0 . Тангенциально к ней через щель высотой h подается охлаждающий воздух с параметрами u_1, T_1 . Предполагается, что на некотором удалении от стенки течение подчиняется закономерностям распространения свободной турбулентной струи в спутном потоке. При этом следует различать динамическую и тепловую зоны смешения. Динамический пограничный слой развивается с передней кромки пластины, тепловой пограничный слой — от точки пересечения внешней (по отношению к основному потоку) границы тепловой зоны смешения с пластиной. Как известно [2], при истечении из сопла конечных размеров область смешения двух потоков условно разбивается на три участка: начальный (область I), переходный (область II) и основной (область III).

Профили относительных избыточных скоростей и температур в основном участке струи при одинаковых теплоемкостях и дозвуковых скоростях смешивающихся потоков описываются зависимостями

$$(1.1) \quad \frac{u-u_0}{u_m-u_0} = \Delta u = (1-\eta_u)^2, \quad \eta_u = \frac{y}{b_u}, \quad b_u = 0.2 \left| \frac{1-m}{1+m} \right| x$$

$$(1.2) \quad \frac{T-T_0}{T_m-T_0} = \Delta T = (1-\eta_T)^2, \quad \eta_T = \frac{y}{b_T}, \quad b_T = 1.2 b_u$$

где u_m и T_m — параметры потока на оси струи, b_u и b_T — ширины динамической и тепловой зон смешения. При сделанных предположениях значения $(u_m-u_0)/(u_1-u_0) = \Delta u_m = \varphi_1(x_+)$, $(T_m-T_0)/(T_1-T_0) = \Delta T_m = \varphi_2(x_+)$ ($x_+ = x/h$) можно определить из сохранения избыточного импульса и теплосодержания [1-3].

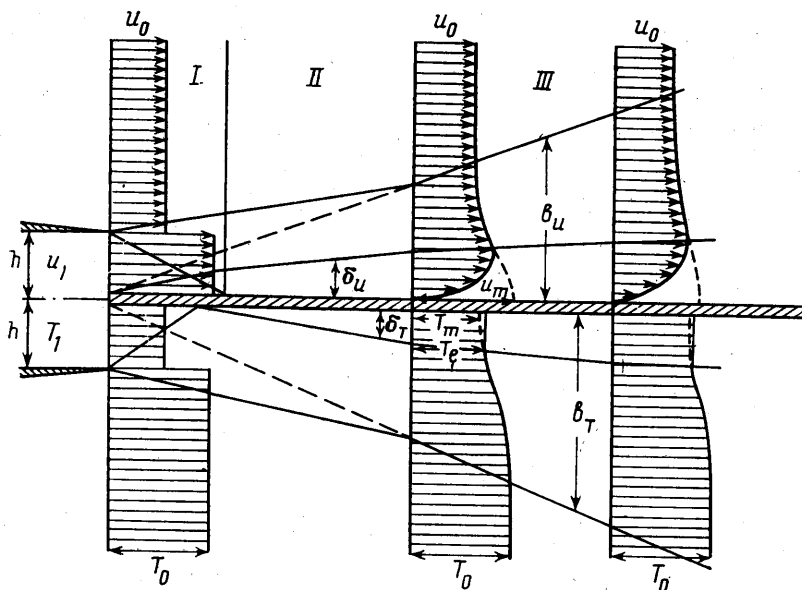
Если в смешивающихся струях имеется начальная турбулентность, то в окрестности $m=1$ угол расширения зоны смешения не зависит от m [1-3]. Например, при начальной турбулентности 3% $b_u/x = \text{const}(m)$ при $0.5 \leq m \leq 2$. Толщина динамического пограничного слоя рассчитывается методом последовательных приближений по следующей формуле, а распределение скорости в нем подчиняется закону

$$(1.3) \quad \delta_{u_i} = 0.296 \int_0^x \left(\frac{\rho_0 u_0 x}{\mu_0} \right)_{i=1}^{-0.2} dx$$

$$(1.4) \quad u'/u_0 = (y/\delta_u)^{1/2}$$

Индекс δ означает, что параметры определяются на границе пограничного слоя.

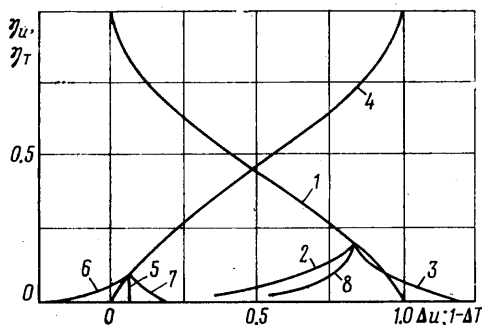
Толщина теплового пограничного слоя δ_T определяется аналогично толщине динамического пограничного слоя. Градиент температуры по толщине теплового пограничного слоя считается пренебрежимо малым (нетеплопроводная стенка), а равновесное значение температуры T_e определяется по формуле (1.2) при $y = \delta_T$.



Фиг. 1

На фиг. 2 в координатах η_u , Δu и η_T , $1 - \Delta T$ показаны профили скоростей и температур (кривые 1 и 4), которые характеризуют струйное течение в любом сечении основного участка. Здесь же нанесены профили скоростей и температур в пограничном слое. Профили скоростей в пограничном слое рассчитаны при $u_m/u_0 = 2$, $\delta_u/b_u = 0.2$ (кривая 2) и при $u_m/u_0 = 0.5$, $\delta_u/b_u = 0.2$ (кривая 3). При $m < 1$ на значительной части пограничного слоя распределения скоростей, вычисленные по формулам (1.1) и (1.4) (см. кривые 1 и 3), близки между собой, и этим объясняется хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений скорости [1]. При $m > 1$ расчетные распределения скоростей сильно различаются между собой (см. кривые 1 и 2) и, следовательно, действительное распределение будет находиться между кривыми 1 и 2. В [2, 10] зона смешения также

разбивается на две части: струйный и пристенный пограничные слои. Однако области автомодельного и неавтомодельного течения отделяются одна от другой по формальному признаку: значением $u = u_{\max}$. Следует ожидать, что вблизи границы пристенного пограничного слоя на распределение скоростей будет оказывать более сильное влияние автомодельное течение, а при приближении к стенке влияние закономерностей турбулентности будет ослабляться. Не



Фиг. 2

вдаваясь в детальное изучение этого интересного явления, в дальнейшем при сравнении с экспериментальными данными будем использовать среднегеометрическое значение скорости в пограничном слое. Этот профиль скорости при $u_m/u_0=2$ и $\delta_u/b_u=0.2$ приведен на фиг. 2 линией 8.

Профили температур в тепловом пограничном слое построены при $\delta_T/b_T=0.1$ в трех случаях: $T_e = T_0 = T_w$ — нетеплопроводная адиабатическая стенка (кривая 5), $T_e > T_w$ — отвод тепла от стенки

(кривая 6), $T_e < T_w$ — подвод тепла к стенке (кривая 7). Распределение температур в тепловом пограничном слое рассчитано по формуле

$$(1.5) \quad \frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = \left(\frac{y}{\delta_T} \right)^{1/2}$$

при $T_w = (1 \pm 0.2) T_m$ и $T_0 = 2 T_m$. Оценим возможные значения δ_u/b_u и δ_T/b_T . Толщина динамического пограничного слоя всегда заключена между

$$(1.6) \quad \delta_{u0} = \frac{0.37x}{\text{Re}_0^{0.2}} \quad \text{и} \quad \delta_{u1} = \frac{0.37x}{\text{Re}_1^{0.2}}$$

$$\left(\text{Re}_0 = \frac{(\rho u)_0 x}{\mu_0}, \quad \text{Re}_1 = \frac{(\rho u)_1 x}{\mu_1} \right)$$

Обычно при $m < 1$ и $n = T_1/T_0 < 1$ величины δ_{u0} и δ_{u1} мало отличаются одна от другой. При $m > 1$ и $n < 1$ эти величины будут различаться сильнее, однако в реальном диапазоне изменения параметров смешивающихся потоков отличие между δ_{u0} и δ_{u1} , как правило, не превышает 20%. Поэтому для предварительных оценок толщины динамического пограничного слоя будем пользоваться значением δ_{u0} . На основании (1.6) и (1.1) получим

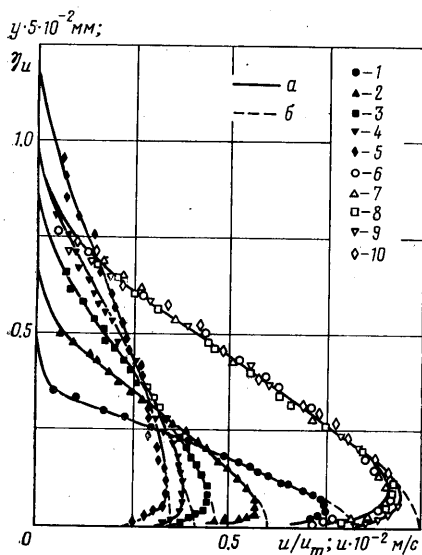
$$\delta_{u0}/b_u = 1.68 | (1+m)/(1-m) | \text{Re}_h^{-0.2} x_+^{-0.2} \quad (\text{Re}_h = (\rho u)_0 h / \mu_0)$$

Следовательно, относительная толщина динамического пограничного слоя уменьшается с увеличением x_+ и Re_h . Например, при $m = \infty$, $\text{Re}_h = 10^4$, с изменением x_+ от 25 до 100 величина δ_{u0}/b_u уменьшается от 0.115 до 0.087, что хорошо согласуется с данными [2, 10]. Наиболее сильное влияние на величину δ_{u0}/b_u оказывает m . Например, при $m = 0.5$ или 2 величина $\delta_{u0}/b_u \approx 0.3$. При $m \rightarrow 1$ и небольшой начальной турбулентности смешивающихся потоков распределение скорости в зоне смешения должно подчиняться закономерностям развития пограничного слоя.

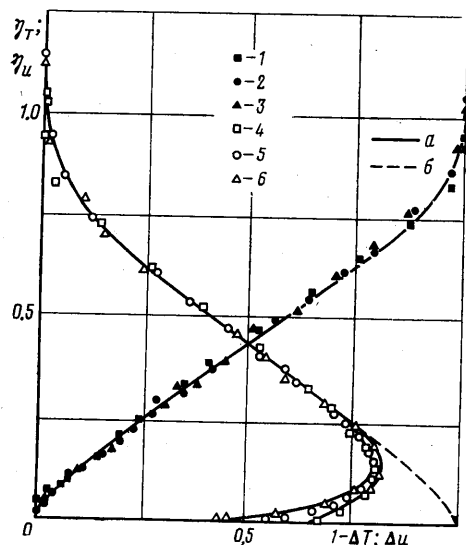
Оценка относительной толщины теплового пограничного слоя более затруднительна, так как начало его развития смещено от среза щели вниз по потоку. Отметим лишь два обстоятельства. Всегда $\delta_T/b_T < \delta_u/b_u$, причем с ростом x_+ эти значения сближаются: при $m \rightarrow 1$ и исчезающем уровне начальной турбулентности распределение температур в зоне смешения нельзя описать закономерностями пограничного слоя из-за наличия тепловой диффузионной зоны смешения.

2. Результаты опытов. Опыты проводились на модели, которая устанавливалась в потоке воздуха на срезе сопла 100×120 мм². Геометрические размеры сопла и модели были выбраны из условия, чтобы в конце пластины сохранилось ядро постоянных скоростей и температур. Расположение модели в сносимом потоке воздуха уменьшало влияние предыстории течения. Толщина динамического пограничного слоя в сечении среза щели не превышала 1 мм.

Исследуемая пластина образовывала верхнюю стенку модели. Охлаждающий воздух поступал через боковые стенки по двум патрубкам в ресивер. Козырек ресивера, укрепленный на его верхней стенке, вместе с



Фиг. 3



Фиг. 4

исследуемой пластиной образовывал щель. Высота щели могла изменяться с помощью прокладок, устанавливаемых между исследуемой пластиной и нижней стенкой модели. Кромка козырька стачивалась до 0,5 мм.

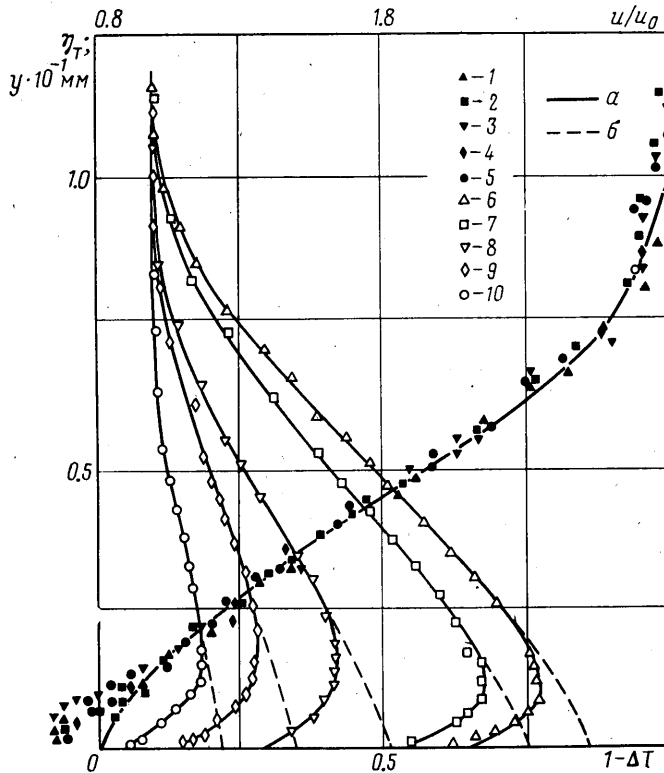
Для уменьшения прогрева охладителя в модели нижняя и боковые стенки ее, а также подводящие охладитель патрубки были сделаны водоохлаждаемыми. Для уменьшения теплоотвода от исследуемой пластины она изготовлялась из текстолита толщиной 1,8 мм ($\lambda = 0,25$ вт/мк), причем между исследуемой пластиной и нижней стенкой модели устанавливался набор пластин из гетинакса, пространство между которыми заполнялось асбестовой крошкой.

При проведении опытов уделялось внимание получению равномерного (по ширине модели) распределения массовой скорости охлаждающего воздуха и высоты щели. Высота щели выдерживалась с точностью $\pm 0,05$ мм, а равномерность раздачи охладителя обеспечивалась с помощью решетки и контролировалась показаниями термопар, установленных в стенке пластины вдоль центральной образующей и двух образующих, отстоящих от центральной на ± 35 мм.

Измерение скоростных напоров и температур в пограничном слое проводилось с помощью комбинированного микронасадка. Минимальное расстояние точки измерения от стенки составляло 0,12 мм.

Было выполнено три серии опытов. В первой серии изучалось распределение скоростей в пограничном слое при $m = \infty$, $n = 1$ ($u_0 = 120$ м/сек, $T_0 =$

$\approx 300^\circ \text{K}$) и высоте щели 1.8 мм, во второй серии — распределение скоростей и температур при $m=3.35$, $n=0.61$ ($u_0=51$ м/сек, $T_0=491^\circ \text{K}$) и высоте щели 2 мм, в третьей серии — распределение скоростей и температур в сечении $x=98$ мм при различных значениях m , $n=0.63$ ($u_0=55$ м/сек, $T_0=470^\circ \text{K}$) и высоте щели 1.8 мм. Результаты этих опытов приведены соответственно на фиг. 3–5. На фиг. 3 приведены значения скоростей в зависимости от y (точки 1–5) и соответствующие им безразмерные величины u/u_m в зависимости от η_u (точки 6–10). Точки 1 и 6, 2 и 7, 3 и 8, 4 и 9, 5 и 10 соответствуют значениям $x=39, 69, 98, 127, 159$ мм. На фиг. 4 даны



Фиг. 5

величины относительных избыточных температур (точки 1–3) и скоростей (точки 4–6) в зависимости от η_T и η_u . Точки 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 соответствуют значениям $x=72, 131, 169$.

На фиг. 5 даны величины относительных избыточных температур в зависимости от η_T (точки 1–5) и относительных скоростей u/u_0 в зависимости от y (точки 6–10). Точки 1 и 6, 2 и 7, 3 и 8, 4 и 9, 5 и 10 соответствуют значениям $m=3.42, 2.9, 2.13, 1.73, 1.41$.

Значения b_u и u_m ; b_T и T_m определялись по наилучшей корреляции зависимостей (1.1) и (1.2) с соответствующими экспериментальными данными, зарегистрированными вне динамического и теплового пограничных слоев.

Линии a на фиг. 3–5 соответствуют расчетным значениям скорости и температуры в турбулентной зоне смешения, причем расчетные данные для относительных избыточных скоростей в пограничном слое приведены на фиг. 3 и 4 лишь для крайних сечений измерения. Линии b на фиг. 3–

5 показывают распределение скорости в динамическом пограничном слое, рассчитанное согласно (1.1).

Из приведенных данных видно, что расчетные распределения скорости и температуры в турбулентной зоне смешения с удовлетворительной точностью описывают соответствующие экспериментальные результаты. Анализ полученных результатов при струйном охлаждении пластины позволяет сделать следующие основные выводы.

В значительной части турбулентной зоны смешения распределение относительных избыточных скоростей и температур автомодельно и с удовлетворительной точностью описывается зависимостями (1.1) и (1.2). Угловые коэффициенты расширения динамической и тепловой зон смешения могут быть рассчитаны по формулам (1.1) и (1.2).

Толщина динамического пограничного слоя с хорошей точностью описывается зависимостью (1.3), а распределение скорости в нем при $m \geq 2$ близко к среднегеометрическому распределению между законами «1/7» и «струйным». При $1 < m < 2$ влияние струи на распределение относительной скорости вблизи стенки ослабевает и при $m \rightarrow 1$ оно приближается к распределению в обычном пограничном слое.

Относительная толщина динамического пограничного слоя возрастает с уменьшением m ($m < 1$), однако даже при $m = 1.41$ $\delta_u/b_u \approx 0.35$.

В опытах не удалось аккуратно определить толщину теплового пограничного слоя из-за наличия, несмотря на принятые меры, некоторого градиента температур. Этот градиент температур вызван, как показали специальные опыты, потерями тепла излучением от стенки. Относительная толщина теплового пограничного слоя δ_T/b_T во всех исследованных случаях не превышала 0.1. Это позволяет в качестве первого приближения определять равновесное значение температуры T_e по величине T_m на оси спутной струи.

Поступила 7 IV 1978.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жестков Б. А., Глазков В. В., Гусева М. Д. Методика расчета температуры стенки при струйном и комбинированном охлаждении. Тр. Ин-та им. П. И. Баранова, 1955, № 267.
2. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
3. Авдусевский В. С., Данилов Ю. И., Кошкин В. К., Кугурин И. Н., Михайлова М. М., Мизеев Ю. С., Сергель О. С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М., Оборонгиз, 1960.
4. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Новосибирск, 1964.
5. Волчков Э. П., Левченко В. Я. Эффективность газовой завесы в турбулентном пограничном слое. ПМТФ, 1965, № 5.
6. Hartnett J. P., Birkebak R. C., Eckert E. R. Velocity distributions, temperature distributions, effectiveness and heat transfer for air injected through a tangential slot into a turbulent boundary layer. Trans. ASME, J. Heat Transfer, 1961, vol. 83, No. 3.
7. Абрамович Г. Н., Кузьмич В. Б., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Экспериментальное исследование сверхзвуковой струи в спутном сверхзвуковом потоке. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 4.
8. Себан, Бек. Профили скорости и температуры в турбулентном пограничном слое с подачей воздуха через тангенциальную щель. Тр. Америк. об-ва инж.-мех. Сер. С, Теплопередача, 1962, т. 84, № 1.
9. Кузьмич В. Б., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Исследование сжимаемого турбулентного пограничного слоя при наличии тангенциального вдува и положительного градиента давления. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 6.
10. Юдаев Б. Н., Михайлов М. С., Савин В. К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М., «Машиностроение», 1977.