

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ОТРЫВНЫХ ЗОНАХ
ПЕРЕД СВЕРХЗВУКОВЫМИ СТРУЯМИ В ДОЗВУКОВОМ
СНОСЯЩЕМ ПОТОКЕ

В. С. АВДУЕВСКИЙ, В. Н. КРЮКОВ, Ю. А. ОСИПОВ,
В. П. СОЛНЦЕВ

(Москва)

Рассматривается теплообмен газа с поверхностью пластины в зоне трехмерного отрыва турбулентного пограничного слоя перед сверхзвуковыми струями, вдуваемыми перпендикулярно дозвуковому сносящему потоку.

Целью исследования было установление основных физических особенностей теплообмена в отрывных зонах перед струйными препятствиями и получение зависимостей распределений локальных коэффициентов теплоотдачи и температуры теплоизолированной стенки от параметров сносящего потока и вдуваемых струй.

В результате экспериментального исследования получены аппроксимирующие зависимости распределения локальных коэффициентов теплоотдачи от числа Маха сносящего потока M_∞ , числа Маха струи M_j , относительной толщины вытеснения пограничного слоя перед отрывом $\Delta_s = \delta_s^*/d$ и степени перегрева струи $T_{0j}/T_{0\infty}$ для отрывных зон перед сверхзвуковыми струйными препятствиями.

1. Экспериментальное исследование проведено в аэродинамической трубе с подогревом воздуха. Открытый рабочий участок представлял собой пластину со сверхзвуковыми профилированными соплами диаметром 10, 20 и 30 мм, установленными перпендикулярно пластине и таким образом, что срез находился заподлицо с поверхностью пластины.

Число Маха на срезе сопл $M_j = 1.4, 1.8$ и 2.2 . Величина отношения полных температур струи и сносящего потока (степень перегрева струй) изменялась в пределах от 0.46 до 1.74. Скорость сносящего потока составляла от 0.2 до 0.7 скорости звука, а относительная толщина вытеснения пограничного слоя перед отрывом Δ_s изменялась от 0.05 до 0.13. Исследование профилей пограничного слоя показало, что во всех случаях пограничный слой перед отрывом был турбулентным.

Температура теплоизолированной стенки измерялась на стационарном тепловом режиме с помощью термопар, зачеканенных в специальную вставку из теплоизоляционного материала. Обеспечение полной теплоизолированности стенки в данном случае весьма сложно, но по оценке величины погрешности измерения температуры за счет неадиабатности стенки и наличия конечного, хотя и малого значения q_w для принятой конструкции незначительна и составляет не более 1.6%.

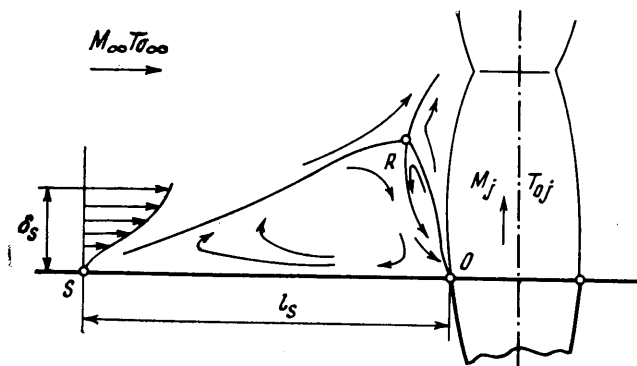
Определение локальных значений коэффициента теплоотдачи производилось нестационарным методом регулярного режима первого рода [1]. Измерение геометрических характеристик отрывных зон производилось с помощью инструментального микроскопа при визуализации картины течения в окрестности среза сопла красящими составами.

2. Экспериментальное исследование теплообмена в области отрывных течений перед струйными препятствиями осложняется некоторыми особенностями, присущими взаимодействию двух потоков.

Повышение давления, вызванное взаимодействием сносящего дозвукового потока с наветренной поверхностью струйного препятствия, распрост-

раяясь вверх по течению, приводит к отрыву турбулентного пограничного слоя перед струей на некотором расстоянии от передней кромки сопла вверх по потоку. В результате отрыва пограничного слоя в окрестности струи возникает пространственная отрывная зона. Схема течения в ней приведена на фиг. 1.

Отличительной особенностью отрывной зоны перед струйным препятствием является наличие свободной линии растекания (в плоскости симметрии течения — свободная критическая точка R), образующейся при взаимо-



Фиг. 1

действию вязких потоков — слоя смешения основного потока и слоя смешения вдуваемой струи. В возвратное движение вниз к пластине вовлекаются струйки тока как из слоя смешения основного потока, так и из слоя смешения струи. При этом в зависимости от соотношения полных давлений сносящего потока и давления на линии равной массы вдуваемой струи может осуществляться один из двух характерных случаев их взаимодействия.

Если давление в свободной критической точке, определяемое полным давлением сносящего потока, меньше (больше) давления на линии равной массы вдуваемой струи, то струя будет отсоединять в зону отрыва меньшее (большее) количество газа, чем эжектировать из нее.

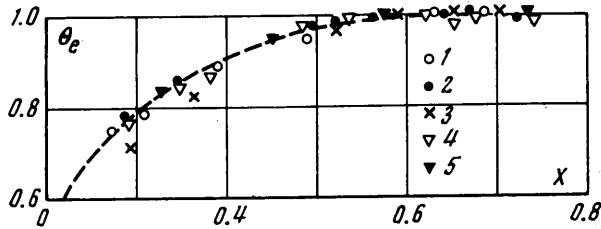
Из этого следует, что влияние струйного характера препятствия, с которым взаимодействует поток, будет соответствовать для указанных выше случаев влиянию отсоса или дополнительного вдува в отрывную зону.

При неодинаковых температурах сносящего потока и вдуваемой струи отмеченные выше особенности их взаимодействия приводят к изменению теплосодержания газа в отрывной зоне как за счет интенсивного тепло- и массопереноса в возвратном течении, так и за счет прямого заброса в зону отрыва некоторого количества газа струи. Поэтому в окрестности передней кромки сопла поперек возвратного течения существует заметный градиент температуры. По мере движения газа в переднюю часть зоны отрыва за счет процесса турбулентного перемешивания происходит постепенное выравнивание температуры. Очевидно, что в этом случае линия отрыва является граничной линией, куда возвратное течение доносит информацию о температуре вдуваемой струи, а по длине отрывной зоны на внешней границе пристеночного пограничного слоя устанавливается некоторое распределение температуры.

При исследовании теплообмена в зонах отрыва, образующихся перед струйными препятствиями, введение в качестве определяющей разности температур внешнего невозмущенного потока и стенки становится весьма

неудобным. В этом случае коэффициент теплоотдачи должен учитывать не только газодинамические условия теплообмена, но и переменность температуры на границе пристеночного слоя, зависящую от указанных выше обстоятельств. Это в значительной мере осложняет анализ и нахождение обобщающих зависимостей для расчета теплообмена.

Определение локальных значений коэффициента теплоотдачи в зоне отрыва перед струйными препятствиями удобнее производить, используя разность температуры на границе пристеночного слоя T_e и температуры стенки T_w . В этом случае следует ожидать, что коэффициент теплоотдачи будет учитывать лишь газодинамические условия теплообмена.



Фиг. 2

Исходя из высказанных выше соображений было проведено исследование влияния различных параметров струи и сносящего потока на распределение температуры на границе пристеночного слоя по длине отрывной зоны.

Распределение температуры теплоизолированной поверхности пластины при $M_j=1.8$ на оси симметрии течения по длине струйной зоны в безразмерных координатах показано на фиг. 2, где точки 1-5 соответствуют $M_\infty=0.23, 0.31, 0.39, 0.47, 0.54$. При применении в качестве характерного масштаба для продольной координаты длины отрывной зоны l_s экспериментальные данные для различных режимов сносящего потока и вдуваемых струй с учетом разброса, вызванного точностью проведенных экспериментов, вполне удовлетворительно аппроксимируются уравнением

$$(2.1) \quad \theta_e = \frac{T_e - T_{0j}}{T_{es} - T_{0j}} = 1 - 0.45 \exp(-4.2X)$$

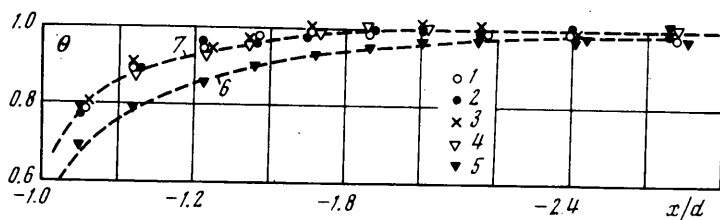
где $X = x / l_s$, T_{es} — температура теплоизолированной стенки в точке отрыва, x — расстояние от кромки сопла. Эта зависимость нанесена на фиг. 2 пунктирной линией.

Результаты измерения температуры теплоизолированной стенки в донной области струи по оси симметрии течения при $M_j=1.8$ представлены на фиг. 3, где $\theta = (T_e - T_{0j}) / (T_{ep} - T_{0j})$, а T_{ep} — температура теплоизолированной пластины на некотором удалении от сопла, где влияние струи уже не сказывается на значении T_e . На фиг. 3 точки 1-5 соответствуют $M_\infty=0.23, 0.31, 0.39, 0.45, 0.55$. Из приведенного графика следует, что на характер распределения температуры заметно влияет схема обтекания струйного препятствия. Так, кривая 6 соответствует режиму обтекания, при котором существует незамкнутая зона отрыва, а кривая 7 — режиму обтекания с линией отрыва, замкнутой на контур сопла вдува. В последнем случае выравнивание температуры стенки происходит значительно быстрее.

В проведенных опытах переход от схемы обтекания с разомкнутой линией отрыва к схеме с замыканием линии отрыва на контур сопла вдува происходил при $M_\infty \leq 0.46$. Более быстрое выравнивание температуры в

донной области при обтекании с замыканием линии отрыва на контур сопла вдува объясняется тем, что в этом случае газ струи, поступивший в зону отрыва из области свободной критической точки, не проникает в донную область, а эжектируется струей.

3. При определении коэффициентов теплоотдачи газа возвратного течения отрывной зоны к поверхности пластины, а также для течения в донной области струи в качестве определяющей принималась температура теплоизолированной стенки.



Фиг. 3

Локальный коэффициент теплоотдачи определяется как $\alpha = q_w (T_e - T_w)^{-1}$. В качестве масштаба для коэффициента теплоотдачи было принято его значение α_s в точке отрыва. Поскольку расчет α_s в точке отрыва представляет известные трудности, было проведено сравнение экспериментально определенных величин α_s с расчетными значениями для коэффициента теплоотдачи к пластине в безградиентном потоке α_p , полученными по критериальному соотношению [2]

$$\text{Nu}_w = 0.029 \text{Re}_w^{0.8} \text{Pr}_w^{0.4} (T_w/T_e)^{0.39}$$

В диапазоне изменения параметров, реализованном в проведенных экспериментах, можно принять $\alpha_s = 1.05\alpha_p$. На развитие пограничного слоя в плоскости симметрии течения влияют в рассматриваемом случае два фактора. За счет положительного градиента давления происходит утолщение пограничного слоя, и, следовательно, можно было бы ожидать уменьшения коэффициента теплоотдачи по сравнению со случаем безградиентного потока. С другой стороны, поскольку существует поперечный градиент давления, вызванный обтеканием трехмерного препятствия, происходит утоньшение пограничного слоя, что, естественно, должно вести к увеличению коэффициента теплоотдачи. Совместное действие этих двух факторов, имеющих противоположное влияние на теплообмен, и приводит к некоторому увеличению коэффициента теплоотдачи в точке отрыва по сравнению с его величиной в той же точке при безградиентном потоке.

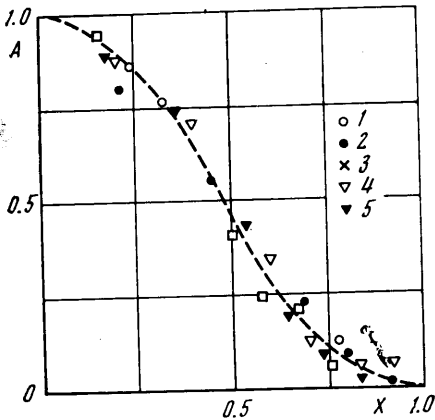
Обработка полученных экспериментальных данных распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по длине отрывной зоны перед струей представлена на фиг. 4, где точки 1-5 соответствуют $M_\infty = 0.23, 0.32, 0.42, 0.50, 0.60$. Получено автомодельное по изменяемым параметрам струи и сносящего потока распределение безразмерных коэффициентов теплоотдачи, которое с учетом точности тепловых экспериментов ($\pm 10\%$) удовлетворительно аппроксимируется соотношением

$$(3.1) \quad A = \frac{\alpha - \alpha_s}{\alpha_0 - \alpha_s} = \exp\left(-2.33 \frac{X^2}{1 - X^2}\right)$$

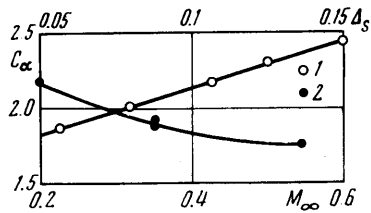
Здесь α_0 — коэффициент теплоотдачи на линии растекания возвратного течения у кромки сопла вдува при $X=0$.

Для практического использования зависимости (3.1) было необходимо вместе с соотношением $\alpha_s = 1.05\alpha_p$ получить зависимость максимального значения коэффициентов теплоотдачи α_0 от параметров струи и сносящего потока.

Анализ результатов проведенного экспериментального исследования показал, что величина максимального коэффициента теплоотдачи в зоне отрыва заметно зависит от числа Маха сносящего потока (фиг. 5, точки 1) и от относительной толщины вытеснения пограничного слоя в точке отрыва (фиг. 5, точки 2). Следует отметить, что величина α_0 практически не зависит в исследованном диапазоне изменения параметров от газодинамических характеристик вдвухае-



Фиг. 4



Фиг. 5

мой струи — числа Маха и степени нерасчетности, однако необходимо иметь в виду, что степень нерасчетности в эксперименте не превышала $n=5$.

Результаты тепловых экспериментов по распределению локальных коэффициентов теплоотдачи хорошо согласуются с ранее полученными данными по визуализации течения и распределению давления в зоне отрыва.

На основании полученных данных максимальное значение коэффициента теплоотдачи у кромки сопла вдува может быть определено с помощью выражения

$$(3.2) \quad C_{\alpha} = \alpha_0 / \alpha_s = [1.25 + 0.8(M_{\infty} - 0.42)] \Delta_s^{-0.18}$$

Теплообмен с поверхностью пластины за вдвухаемой струей определяется характеристиками пограничного слоя, который развивается в условиях взаимодействия пространственных вихрей с поверхностью пластины. Закономерности развития пограничного слоя в таком течении в настоящее время не выяснены и обобщение полученных данных затруднительно.

Результаты измерения коэффициентов теплоотдачи в условиях $T_{0j} = T_{0\infty}$ при различных значениях M_{∞} сносящего потока показали, что в области за струей не наблюдается резких повышений интенсивности теплообмена и с удалением от струи вниз по сносящему потоку коэффициенты теплоотдачи отменяются к значениям, соответствующим их величинам на пластине в безградиентном потоке. Следует отметить, что последние опытные данные получены в экспериментах, когда обтекание струи на поверхности пластины происходило с замыканием линии отрыва на контур сопла вдува.

Поступила 17 VI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрагьев Г. М. Тепловые измерения М.—Л., Машигиз, 1957.
2. Козлов Л. В. Экспериментальное исследование теплоотдачи на плоской пластине в сверхзвуковом потоке. М., Оборонгиз, 1958.