

3. Сенковенко С. А., Стасенко А. Л. Релаксационные процессы в сверхзвуковых струях газа.— М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Васенин И. М., Архипов В. А., Бутов В. Г. и др. Газовая динамика двухфазных течений в соплах.— Томск: Изд-во ТГУ, 1986.
5. Благосклонов В. И., Стасенко А. Л. Двумерные сверхзвуковые течения смеси пара и капель в сопле и затопленной струе // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1978.— № 1.
6. Гаркуша В. И., Кузнецов В. М., Набережнова Г. В., Стасенко А. Л. Смешение испаряющихся мелкодисперсных частиц со сносимым потоком газа // ПМТФ.— 1982.— № 3.
7. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами.— М.: Мир, 1986.
8. Уонг. Обтекание вращающейся сферы свободномолекулярным потоком // РТК.— 1972.— Т. 10, № 5.
9. Ковтуненко В. М., Камеко В. Ф., Яскевич Э. П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов.— Киев: Наук. думка, 1977.
10. Галкин В. С., Зворыкин Л. Л. Вращательные производные тел в гиперзвуковом потоке разреженного газа // Тр. ЦАГИ.— 1984.— Вып. 2220.
11. Гаркуша В. И., Стасенко А. Л. Объемная неизотермичность частиц в неоднородных потоках // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1977.— № 2.
12. Коган М. Н. Динамика разреженного газа.— М.: Наука, 1967.
13. Петров Ю. И. Физика малых частиц.— М.: Наука, 1982.
14. Самарский А. А. Теория разностных схем.— М.: Наука, 1977.

г. Москва

Поступила 31/V 1988 г.

УДК 532.526.4

В. П. Лебедев, М. И. Низовцев

ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСТРЕЧНОЙ ПРИСТЕННОЙ СТРУИ

Встречные течения широко распространены в природе и имеют место в различных технологических процессах и технических устройствах. Например, пристенные встречные струи используются при сварке в среде инертного газа, при газодинамическом регулировании сопла турбореактивного двигателя, при моделировании атмосферных процессов. Для защиты элементов энергетического оборудования от высокотемпературных потоков газа весьма эффективными могут быть газовые завесы [1]. В некоторых случаях из-за конструктивных особенностей рабочего оборудования тепловая защита стенки может осуществляться подачей охлаждающего газа через щель навстречу потоку или под большим углом к направлению его движения [2, 3]. Несмотря на частое использование пристенных встречных струй в различных устройствах, исследования их ограничены.

В данной экспериментальной работе изучен процесс теплового смешения встречной пристенной струи с газовым потоком, определена эффективность тепловой защиты адиабатной стенки в направлении движения струи. Показано, что встречная пристенная струя при определенных условиях может эффективно защищать стенку канала.

Схема изучаемого течения приведена на рис. 1. В опытах пристенная встречная струя создавалась вдувом воздуха через тангенциальную щель высотой $s = 4,7$ мм, установленную на нижней стенке аэродинамического канала с поперечным сечением 150×145 мм и длиной 1200 мм. Рабочая стенка канала адиабатическая, выполнена из стеклотекстолита. Скорость основного потока воздуха в опытах поддерживалась постоянной, равной $U_0 = 16$ м/с, скорость вторичного потока изменялась от 6 до 51 м/с. При этом параметр вдува $m = \rho_s U_s / \rho_0 U_0$ варьировался в пределах 0,3—2,6. Температура основного потока $T_0 = 15-20$ °С, а вторичного $T_s = 70-80$ °С.

Измерения полей температур проводились термодпарным зондом с диаметром спая 0,2 мм, который перемещался в вертикальном направлении управляемым ЭВМ координатным устройством с минимальным шагом перемещения 0,01 мм. В зоне смешения пристенной струи с набегающим потоком уровень турбулентности по данным наших измерений может достигать 40 %, поэтому для получения надежных средних значений температур необходимо провести осреднение измеряемого сигнала за достаточно большой промежуток времени. В экспериментах сигнал с термозонда поступал на комплекс сбора и обработки информации на базе ЭВМ.

«Электроника 60». В каждой точке проводилось 500 измерений температуры за время 10 с, затем находилась средняя температура T . Для разных параметров вдува в 10—15 сечениях получены подробные распределения температуры.

На рис. 1 приведены безразмерные профили температуры $\vartheta = (T - T_0)/(T_s - T_0)$ по высоте канала в нескольких характерных сечениях x/s (1 — 0,4; 2 — 8,9; 3 — 13,2; 4 — 15,3; 5 — 19,6) [при $m = 2,6$]. Из графика видно, что в начальных сечениях профили температуры имеют два максимума. Первый, наибольший и расположенный вблизи поверхности, соответствует движению нагретой струи вдоль адиабатной стенки, а второй, по-видимому, ее следу после разворота. При увеличении расстояния от среза щели второй максимум становится менее заметным, а первый начинает постепенно уменьшаться, затем отходит от стенки канала и сливается со вторым. По положению максимумов температуры можно проследить траекторию движения встречной пристенной струи.

На рис. 2 линии соединяют максимумы температур в различных сечениях для $m = 2,6; 2,1; 1,5; 0,7$ (точки 1—4). Видно, что характер проникновения струи в набегающий поток зависит от соотношения их скоростей. Чем больше m , тем дальше пристенная струя проникает в основной поток и шире оказывается зона разворота. Если при больших параметрах вдува струя сначала движется вдоль стенки канала, а затем начинает разворачиваться и сноситься набегающим потоком, то при малых m струя практически сразу после выхода из щели разворачивается и увлекается основным потоком.

Эффективность тепловой защиты адиабатной поверхности обычно характеризуется параметром $\Theta = (T_w - T_0)/(T_s - T_0)$, где T_w — температура стенки канала. В данных исследованиях при нахождении Θ температура стенки принималась равной температуре потока вблизи адиабатной поверхности и определялась по измеренному профилю температур. Найденные таким способом значения Θ достоверны, поскольку вблизи адиабатной стенки $dT/dy \rightarrow 0$. На рис. 3 показано полученное в опытах изменение Θ по длине канала для $m = 2,6; 2,1; 1,5; 0,7; 0,5; 0,3$ (точки 1—6). Характерной особенностью изменения эффективности завесы встречной пристенной струи является резкое падение параметра Θ при увеличении расстояния от щели. Такого сильного снижения Θ при спутной завесе не наблюдалось [1]. В результате имеется конечное максимальное расстояние действия завесы L , на котором температура стенки достигает значения температуры основного потока, т. е. $T_w = T_0$ и $\Theta = 0$. Это расстояние будем называть дальностью. При $m > 1$ и заданной стесненности канала ($H/s = 30$, H — высота канала) получена линейная экспериментальная зависимость для тепловой дальности

$$(1) \quad L/s = 15,3(m - 1).$$

Из приведенных экспериментальных данных рис. 3 также следует, что начальный участок x_0 , на котором эффективность завесы практически не изменяется и близка к единице, имеет место только при больших скоростях вдува струи (как показали опыты, при $m > 1,2$). Длина начального участка при встречном вдуве существенно меньше длины начального участка при спутном вдуве и описывается эмпирическим соотношением

$$(2) \quad x_0/s = 9m - 11.$$

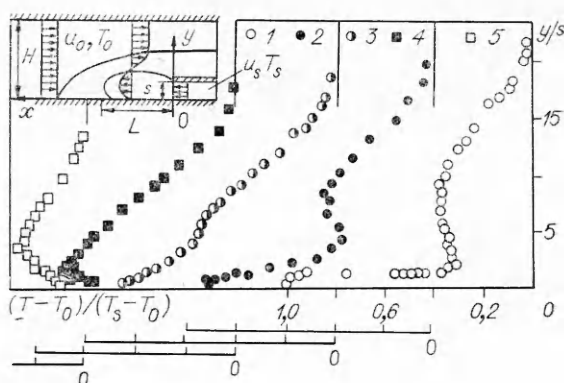


Рис. 1

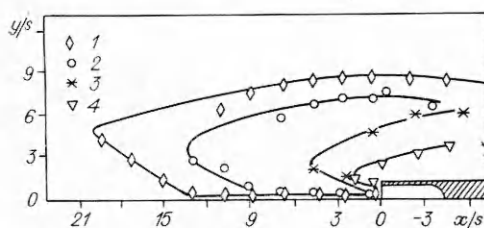


Рис. 2

При параметрах вдува, меньших 1,2, температура стенки начинает изменяться непосредственно от среза щели и начальный участок отсутствует. При дальнейшем уменьшении m температура стенки уже на срезе щели отличается от температуры вдуваемого газа T_s . Это приводит к тому, что начальная эффективность завесы $\Theta_1 = (T_{w1} - T_0)/(T_s - T_0)$

становится меньше единицы на выходе из щели. Здесь T_{w1} — температура стенки в сечении среза щели. Данное явление при спутной завесе отсутствовало. Экспериментальная зависимость Θ_1 от m показана на рис. 4. Видно, что границей разного влияния m на Θ_1 является примерное равенство скоростей струи и набегающего потока. При $m < 1,2$ с уменьшением m начальная эффективность падает, а при $m > 1,2$ практически не зависит от соотношения скоростей и равна ~ 1 .

Для выяснения причин снижения начальной эффективности проанализированы профили температур на срезе щели при $m = 1,5; 0,7; 0,5; 0,3$ (точки 1—4, рис. 5). Из графика видно, что при $m = 1,5$ профиль температуры на срезе равномерный ($T \approx T_{w1} \approx T_s$) и $\theta \approx 1$. При $m = 0,7; 0,5$ в профиле температуры со стороны нижней стенки канала появляется область с более низкой температурой. Это связано с проникновением вдоль нижней стенки канала внутрь щели холодного основного потока и смещением его со встречным. При параметре вдува $m = 0,3$, очевидно, происходят более интенсивное проникновение набегающего потока в щель и, как следствие, падение температуры по всей высоте щели. Приведенные на рис. 5 экспериментальные данные подтверждают высказанное в [2] предположение о возможности проникновения основного потока внутрь щели при его взаимодействии со встречной пристенной струей и малых значениях m .

На основании анализа экспериментальных данных в настоящей работе получена обобщающая зависимость для расчета эффективности завесы пристенной встречной струи в области $x < L$

$$(3) \quad \Delta\Theta = 1 - \exp(-0,25\Delta x/s) \quad (\Delta\Theta = \Theta - \Theta_1, \Delta x = x - x_0).$$

Таким образом, для определения эффективности встречной завесы необходимо знать ее значение на срезе щели Θ_1 , длину начального участка x_0 и тепловую дальность L . Все эти параметры были определены в опытах и описаны выше. Результаты экспериментов удовлетворительно обобщаются предложенной зависимостью, что видно из рис. 6, где точки 1—6 отвечают $m = 2,6; 2,1; 1,5; 0,7; 0,5; 0,3$; 7 — расчет по формуле (3).

Определенный интерес представляет сопоставление длины начального участка и тепловой дальности, вычисленных по формулам (1) и (2), с соответствующими участками траектории движения встречной пристенной струи (см. рис. 2). Отметим, что длина начального участка встречной пристенной струи практически отвечает области распространения струи вдоль стенки канала.

Кроме того, тепловая дальность L , полученная по изменению температуры на адиабатной стенке и определяемая по (1), оказывается

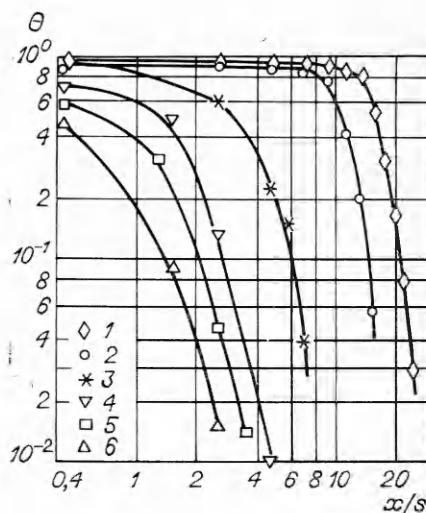


Рис. 3

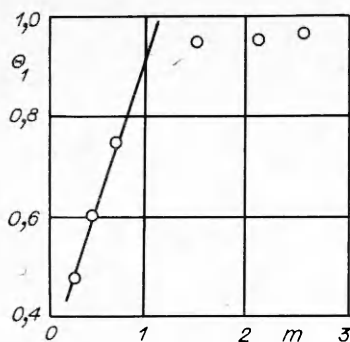


Рис. 4

несколько больше глубины проникновения встречной струи, определенной с помощью линии максимальных температур. Это, по-видимому, связано с тем, что в конце зоны разворота струи, когда она отходит от стенки, вблизи поверхности образуются вихревые структуры [4], которые приводят к интенсивному перемешиванию потоков и увеличению дальности у стенки.

В результате проведенного исследования выявлены характерные особенности теплового смешения пристенной струи с набегающим потоком. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что встречная пристенная струя может быть использована для регулируемой гидродинамической защиты поверхности выше по потоку от места вдува, и определить характеристики такой тепловой завесы.

Авторы выражают благодарность Э. П. Волчкову за постоянное внимание к работе и полезное обсуждение ее результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волчков Э. П. Пристенные газовые завесы. — Новосибирск: Наука, 1983.
2. Волчков Э. П., Лебедев В. П., Шишкин Н. Е. Эффективность газовой завесы при взаимодействии пристенной струи со встречным потоком // Теплообмен-VII. — Минск, 1984. — Т. 1, ч. 2.
3. Репухов В. М., Богачук-Козачук К. А., Зотов Е. Н. Эффективность тепловой завесы за перфорацией на скругленном торце симметрично обтекаемой пластины // Там же.
4. Клецов Ю. М. Распространение турбулентной струи, соударяющейся с плоской поверхностью во внешнем потоке // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1978. — № 5.

г. Новосибирск

Поступила 10/V 1988 г.

УДК 536.27

И. Г. Дик, О. В. Матвиенко

ТЕПЛОБМЕН ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА С ОБЪЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА

Теплообмен закрученных потоков представляет интерес в связи с разработкой и эксплуатацией различных энергетических устройств с использованием местной закрутки потока. Многие особенности таких потоков рассмотрены в [1—3]. Численному моделированию гидродинамики внутренних закрученных потоков посвящены работы [4—6].

В настоящей работе проведено численное исследование влияния закрутки на теплообмен ламинарного закрученного потока с внутренним источником тепла постоянной интенсивности. Известно, что потоки с подобными источниками тепла применяются в ряде технологических устройств [7]. Кроме того, внутренний источник тепла постоянной интенсивности позволяет моделировать теплообмен химически реагирующего потока с невысоким значением теплового эффекта [8].