

УДК 532.525.2

© 1998 г. А.И. УСМАНОВ

## ВЛИЯНИЕ СНОСЯЩЕГО ПОТОКА НА РАСХОД ГАЗА, ВЫТЕКАЮЩЕГО ИЗ ОТВЕРСТИЯ

Рассматривается зависимость коэффициента расхода газа, выдуваемого из отверстия (сопла) в поперечные сносящие до- и трансзвуковой потоки от определяющих параметров – чисел Маха потока и струи, нерасчетности, угла наклона сопла  $\beta$  и т.д. Физическая картина течения внутри канала сопла получена по результатам экспериментальных исследований, проведенных при  $0,3 < M_\infty < 1,75$ ;  $\beta = 60, 90, 120^\circ$ . Приведены результаты измерения давления перед и за отверстием и по образующим отверстия с наветренной и подветренной сторон. Показано, что при выдуве струи в сносящий боковой поток коэффициент расхода струи может быть выше, чем при выдуве аналогичной струи в затопленное пространство.

При истечении газа из отверстия на обтекаемой поверхности под большим углом к вектору скорости сносящего потока картина течения в самой струе и внутри сопла будет существенно отличаться от случая истечения в затопленное пространство. Такой процесс выдува струи характеризуется коэффициентами расхода, изменяющимися в зависимости от перепада давления, угла  $\beta$ , формы отверстия, радиуса закругления входных кромок сопла и числа  $M_\infty$  сносящего потока. Значительный интерес представляет вариант, когда струя выдувается в трансзвуковой поток.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных с целью определения коэффициента расхода при выдуве поперечных струй.

Эксперименты проводились в трансзвуковой аэродинамической трубе в диапазоне  $0,3 < M_\infty < 1,75$ . В рабочую часть трубы устанавливалась модель клина, в горизонтальную поверхность которой были вмонтированы сменные вставки с цилиндрическими и коническими соплами. Сопла были ориентированы под углами  $\beta = 60, 90, 120^\circ$  к сносящему потоку. Пограничный слой на поверхности модели перед местом выдува струи был турбулентным. На модели дренировались внешняя поверхность около выходного сечения сопла и внутренняя поверхность сопел – вдоль двух образующих, расположенных на наветренной и подветренной сторонах по отношению к набегающему потоку. Расход воздуха через сопло измерялся с помощью расходомера.

В качестве основного параметра, определяющего характер течения в сопле и в возмущенной области вокруг струи, было выбрано отношение полного давления на входе в сопло  $P_{0j}$  к статическому давлению в невозмущенном потоке  $P_\infty$ , т.е.  $P_j = P_{0j} / P_\infty$ . Температуры воздуха в струе и в набегающем потоке были примерно равны.

Для проведения анализа экспериментальных данных о коэффициентах расхода при истечении газа из цилиндрических отверстий в сносящий поток, а также сравнения с аналогичными результатами, полученными для сужающихся сопел и отверстий в тонкой стенке, были рассмотрены результаты, изложенные в [1–6].

Основные выводы проведенного анализа сводятся к следующему. При истечении газа в затопленное пространство через отверстие в тонкой стенке коэффициент

расхода  $K_0$  уменьшается в соответствии с уменьшением параметра динамического подобия  $\Delta P/q_\infty$  ( $K_0 = G/(f_j \sqrt{2\rho\Delta P})$ , где  $G$  – расход газа через отверстие,  $f_j$  – площадь выходного сечения,  $\rho$  – плотность,  $\Delta P$  – перепад давления,  $q_\infty$  – скоростной напор в набегающем потоке, индекс ноль относится к случаю выдува струи в затопленное пространство). При  $\sqrt{\Delta P/q_\infty} > 2$  коэффициент  $K_0$  становится постоянным и равным примерно 0,6. Скругленные входные кромки с относительным радиусом округления  $r/d_j > 0,2$  обеспечивают заполнение всего поперечного сечения отверстия вытекающим газом и приближают значения  $K_0$  к единице.

Исследования изменения коэффициента расхода при истечении струи газа через отверстие в сносящий поток малой скорости в зависимости от относительной протяженности отверстия  $l/d_j$  ( $l/d_j \leq 0,25$ ) показали, что с увеличением  $l/d_j$  при постоянном перепаде  $\Delta P$  коэффициент  $K$  увеличивается пропорционально этому параметру [3].

Изменение коэффициента  $K$  в зависимости от относительной плотности тока  $m_q = \rho_j V_j / (\rho_\infty V_\infty)$  показывает [4], что по мере увеличения  $m_q$  влияние сносящего потока на коэффициент расхода уменьшается, а значения  $K$  стремятся к соответствующим значениям при истечении в затопленное пространство. Величина  $K$  уменьшается при увеличении угла наклона оси сопла  $\beta$  от 30 до 90°.

В [6] приведены результаты исследования структуры течения внутри канала при истечении газа в сносящий поток ( $V_j/V_\infty = 1-3$ ), из которых следует, что на наветренной стороне сопла скорость движения газа замедляется (примерно в 2 раза), а на подветренной стороне – ускоряется (примерно до 1,5 раза). Результат воздействия сносящего потока проявляется в деформации эпюры давления в поперечном сечении струи и приводит к образованию вихревых течений как в сносящем потоке, так и в самой струе.

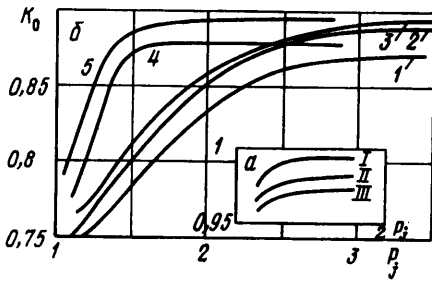
Из анализа рассмотренных работ следует, что в настоящее время недостаточно изучено изменение коэффициента  $K$  в зависимости от угла наклона струй при  $\beta > 90^\circ$  и относительной длины канала отверстия ( $l/d_j > 1$ ) и не определены режимы течения, при которых прекращается влияние набегающего потока на расход газа через сопло при боковом выдуве струй.

Зависимости коэффициента расхода  $K_0$  от  $P_j$  по результатам обобщения экспериментальных данных автора и работ [1, 3, 4, 6] приведены на фиг. 1. На графике *a* показано изменение  $K_0$  для профилированных сопел (данные [4]). На графике *б* приведены данные автора для конических сопел с углами входного конуса  $\gamma = 60-70^\circ$  и для цилиндрических отверстий с острой входной кромкой. Основной диапазон изменения коэффициента  $K_0$  составляет 0,8–0,9.

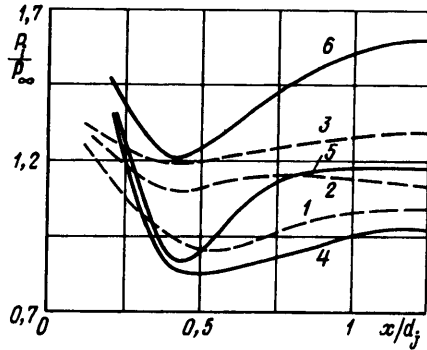
По результатам работ [1, 3] можно заключить, что для отверстий в тонкой стенке в рассматриваемом диапазоне  $P_j$  коэффициент  $K_0$  изменяется от 0,5 до 0,6. Наибольшее значение  $K_0$  реализуется у профилированных сопел ( $K_0 = 0,94-0,99$ ), причем для всех рассмотренных сопел коэффициент  $K_0$  становится постоянным при сверхкритических перепадах давления, т.е. при  $P_j > 2,0$ .

При истечении струй в сносящий поток под большим углом  $\beta$  на наветренной стороне перед струей образуется область повышенного давления, которая при перепадах давления  $P_j < 2$  "отжимает" струю от передней стенки сопла. Таким образом, площадь истекающей струи внутри сопла уменьшается, что и приводит к уменьшению коэффициента расхода  $K$ .

Чтобы оценить изменение коэффициента расхода газа, вытекающего в набегающий поток из боковых отверстий, и изучить картину течения в таких отверстиях, были проведены измерения расхода и распределения давления вдоль образующих цилиндрических отверстий ( $P_i = f(x/d_j)$ ), направленных под углами  $\beta = 60, 90, 120^\circ$  к сносящему потоку. Данные по распределению давления в канале отверстия на подветрен-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость коэффициента расхода  $K_0$  от параметра  $P_j$ : *a* – профилированные сопла  $\beta = 30, 45, 60-90^\circ$  (кривые I–III), данные [4]; *b* – конические сопла с углом входного конуса  $60-70^\circ$   $\beta = 60, 135^\circ$  (кривые 4, 5) и цилиндрические отверстия  $\beta = 60, 90, 120^\circ$  (кривые 1–3)

Фиг. 2. Распределение давления в каналах цилиндрических отверстий при  $M = 0,85$ , расположенных под углами  $\beta = 60^\circ$  (кривые 1, 4),  $\beta = 90^\circ$  (2, 5),  $\beta = 120^\circ$  (3, 6),  $P_j = 1,4$  (штриховые),  $P_j = 2$  (сплошные)

ной стороне по отношению к набегающему потоку приведены на фиг. 2 для двух значений нерасчетности:  $P_j = 1,4$  (пунктирные кривые), и  $P_j = 2$  (сплошные кривые) при  $M_\infty = 0,85$ .

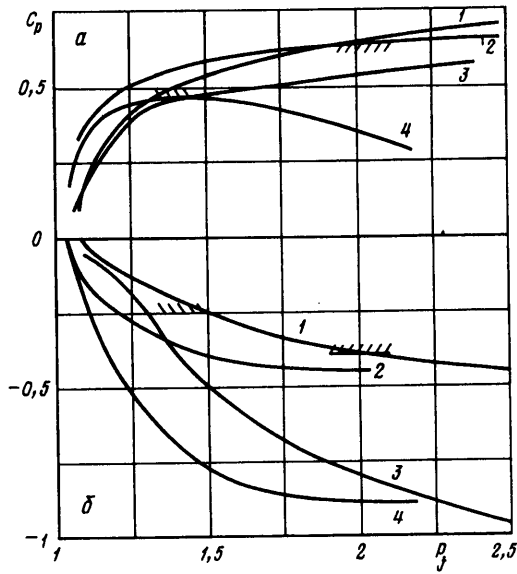
При наличии острых входных кромок в канале происходит отрыв течения от стенок, что наглядно видно по понижению давления на подветренной стороне канала на расстоянии  $x/d_j = 0,4-0,5$  от входного отверстия. Наибольшее разрежение реализуется для отверстия с  $\beta = 60^\circ$  (кривая 4), и в этом случае отрывная зона внутри канала имеет наибольшую протяженность.

Сравнение представленных эпюр давления внутри канала с аналогичными величинами для варианта истечения струй в затопленное пространство показывает, что в рассматриваемом случае уровни давления всюду выше.

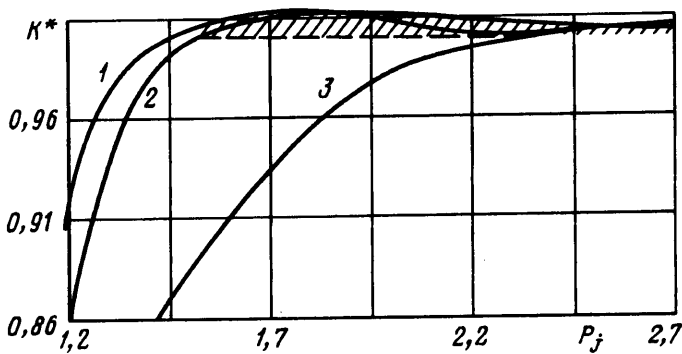
Эпюры давления, измеренные на поверхности модели перед и за струей, позволяют установить факт распространения газа из области высокого давления, находящейся перед струей, внутрь отверстия с наветренной стороны потока, а также эжектирующий эффект из отрывной зоны в канале на подветренной стороне отверстия.

Изменение коэффициента давления  $C_p = (P_i - P_\infty)/q_\infty$  на поверхности модели в зависимости от отношения  $P_j$  и угла наклона оси сопла  $\beta$  представлено на фиг. 3, *a* (наветренная сторона) и *b* (подветренная сторона). Штриховкой нанесены уровни давления в выходном сечении канала на наветренной и подветренной сторонах при  $P_j = 1,4$  и  $2,0$  ( $M_\infty = 0,85, \beta = 90^\circ$ ). Из графиков следует, что за струей образуется зона разрежения, давление в которой ниже, чем в невозмущенном потоке. В эту зону происходит отсос газа из отрывной зоны, сформировавшейся в канале отверстия. Это приводит к увеличению коэффициента  $K$  по сравнению с истечением в невозмущенную среду с тем же уровнем перепада давления. В некотором диапазоне  $P_j$  отношение коэффициентов расхода  $K^* = K/K_0$  становится больше единицы, что показано на фиг. 4. Из анализа графика следует, что чем меньше число  $M_\infty$ , тем раньше по параметру  $P_j$  реализуется такой режим течения. Аналогичная тенденция наблюдается также при уменьшении угла  $\beta$ .

При небольших сверхкритических перепадах давления образование отрывной зоны на входе в сопло приводит к реализации критического течения ( $M > 1$ ) внутри сопла и к последующему ускорению потока до сверхзвуковых скоростей. В этих случаях, как



Фиг. 3. Давление на поверхности модели перед (а) и за (б) поперечной струей:  $(\beta^\circ, M_\infty) = (90, 0,85), (90, 0,575), (120, 0,85), (120, 0,85)$  соответствуют кривым 1-4

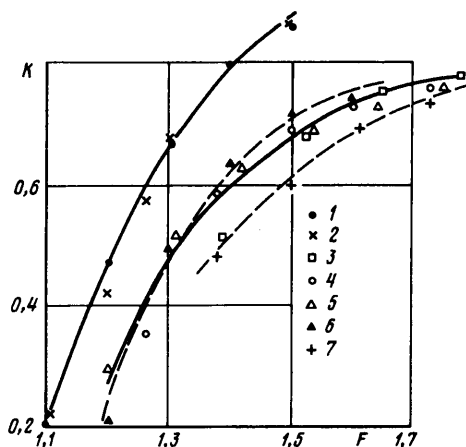


Фиг. 4. Зависимость величины  $K^*$  от параметра  $P_j$  ( $\beta = 90^\circ$ );  $M_\infty = 0,575; 0,70; 0,85$  (кривые 1-3)

показывают экспериментальные данные, величина  $K^*$  также может быть больше единицы. Этот процесс реализуется в цилиндрических и конических отверстиях с острой входной кромкой. Было замечено, что наибольшее влияние величины  $P_j$  проявляется в профилированных и сужающихся соплах, поскольку отсутствие зон отрыва в сопле создает меньше предпосылок для воздействия сносящего потока на каналное течение. Скругление входных кромок в цилиндрических каналах также повышает величину  $K$  [3].

На фиг. 5 приведены изменения коэффициента расхода от параметра  $F = P_j M_\infty^{-1/(\gamma-1)}$  для  $\beta = 90^\circ$  при истечении воздушных струй в набегающий поток. Зависимости  $K(F)$  для каждой группы отверстий в рассмотренном диапазоне чисел  $M_\infty$  удовлетворительно коррелируются, за исключением варианта с выдувом из отверстий в тонкой стенке (фиг. 5, случаи 6, 7).

Фиг. 5. Зависимость коэффициента  $K$  от параметра  $F$  ( $\beta = 90^\circ$ ) для случаев: 1, 2 – выдув из профилированного сопла при  $M_\infty = 0,7$  и  $1,0$ ; 3, 4, 5 – выдув из цилиндрического отверстия с острыми входными кромками в поток при  $M_\infty = 0,55, 0,7, 1$ ; 6, 7 – истечение из отверстия в тонкой стенке в сносящий поток с числами  $M_\infty = 0,7$  и  $1,0$  [1, 3]



Влияние угла наклона отверстия на величину  $K$  наиболее заметно проявляется при  $\beta \geq 90^\circ$  и  $P_j < 1,5-1,6$ . Например, при увеличении угла выдува  $\beta$  от  $90$  до  $120^\circ$  наблюдается снижение коэффициента  $K$  примерно на 15%.

При использовании сопел с образованием отрывной зоны на входных кромках основное влияние на коэффициент  $K$  оказывает не угол наклона сопла, а толщина оторвавшегося слоя. Поэтому при малых значениях  $P_j$  ( $P_j < 1,1$ ) выявить закономерность  $K = f(\beta)$  не удастся, так как сказывается влияние обоих этих факторов одновременно. Влияние углов  $\beta$  на величину  $K$  становится также несущественным при сверхкритических режимах истечения струи.

При трансзвуковых числах Маха сносящего потока влияние  $M_\infty$  на коэффициент  $K$  подчинено тем же закономерностям, что и при обтекании поперечной струи дозвуковым потоком большой скорости. При  $M_\infty > 1,5$  ударная волна перед струей вызывает образование отрывной зоны, в которой давление ниже давления торможения в невозмущенном потоке, поэтому дросселирование струи уменьшается.

Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента расхода при истечении из сверхзвукового сопла с  $M_j = 2,0$  в сносящий поток с  $M_\infty = 1,75$  показали, что при  $n = P_j/P_\infty > 1,0$  влияния потока на величину  $K$  не наблюдается.

**Заключение.** При выдуве струи в сносящий дозвуковой и трансзвуковой потоки коэффициент расхода струи может быть выше, чем при выдуве аналогичной струи в затопленное пространство. Влияние набегающего потока проявляется в данном случае через отрывную зону повышенного давления перед струей и низкого давления – за ней. Эти зоны при некоторых режимах взаимодействия струи и потока могут изменить течение внутри канала сопла, уменьшив или увеличив его проходное сечение.

**От редакции.** В связи со смертью автора статья была подготовлена для опубликования В.Н. Шманенковым.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шандоров Г.С. Истечение из канала в неподвижную и движущуюся среду // ЖТФ. 1957. Т. 27. Вып. 1. С. 156.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.

3. Горбунов Г.М., Михайлов А.И., Борисов В.В. и др. Рабочий процесс и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей. М.: Оборонгиз, 1959. 285 с.
4. Dewey P.E. A preliminary investigation of aerodynamic characteristics of small inclined air outlets at transonic Mach numbers // NASA. TN. 1955. № 3442. 21 p.
5. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н. Управление и стабилизация в аэродинамике. М.: Высш. шк., 1978. 480 с.
6. Андреопулос Дж. Измерение поля течения внутри трубки, из которой истекает струя перпендикулярно поперечному потоку // Теорет. основы инж. расчетов. 1982. Т. 104. № 4. С. 160–168.

Москва

Поступила в редакцию  
7.IV.1995