

УДК 532.526.4:533.6.011.5.:536.24

© 1998 г. А.Н. БАТОВ, **К.И. МЕДВЕДЕВ**, **Ю.А. ПАНОВ**

ТЕПЛООБМЕН И СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ В ВЫЕМКАХ НА ПОВЕРХНОСТИ, ОБТЕКАЕМОЙ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

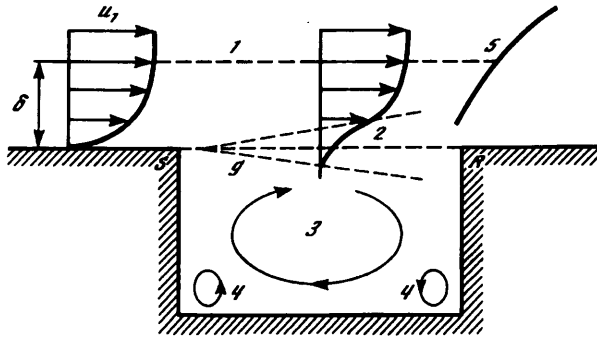
Экспериментально исследованы характеристики течения и теплообмен в двумерных и трехмерных выемках открытого типа на плоской и цилиндрической поверхностях, обтекаемых сверхзвуковым потоком в присутствии турбулентного пограничного слоя. Выявлены влияние числа Маха, толщины пограничного слоя, формы выемки и угла ее наклона к направлению набегающего потока на параметры течения в слое смешения над выемкой и распределение тепловых потоков и давления по поверхности выемки и ее дне.

Результаты исследования структуры течения и теплообмена в выемках различной формы и различного углубления представляют интерес для специалистов ракетно-космической техники. В качестве выемок на поверхности высокоскоростного летательного аппарата могут быть сопла неработающих струйных органов управления, щели между плитками теплозащитного покрытия. Большинство опубликованных работ посвящено исследованию структуры течения в плоских выемках (щели в плоской поверхности, кольцевые щели на цилиндрической поверхности). Ниже приводятся экспериментальные данные, полученные при изучении структуры течения и теплообмена в двумерных, квадратных и осесимметричных выемках открытого типа. Выемка считается открытой, если оторвавшийся от передней кромки выемки поток присоединяется к верхней части задней кромки выемки.

Трехмерные прямоугольные и осесимметричные выемки располагались в стенках рабочих частей аэродинамических труб с плоскими соплами. Двумерные выемки представляли собой кольцевые щели на цилиндрической части кольцевого сверхзвукового сопла аэродинамической трубы. Число Маха M_1 набегающего потока изменялось от 2,1 до 4. Пограничный слой перед выемками был турбулентный, его толщина δ менялась от 0,3 до 20 мм. Число Рейнольдса, подсчитанное по параметрам набегающего потока и длине в 1 м, изменялось от $3 \cdot 10^6$ до $4,8 \cdot 10^8$. Статическое давление измерялось с помощью дренажа поверхности выемок, тепловой поток к стенкам измерялся калориметрическими датчиками, температура газа в выемке – термопарой открытого типа, скорость течения – с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости на основе сканирующего интерферометра Фабри – Перо при запылении потока частицами Al_2O_3 размером менее 1,0 мкм, что позволило получить ошибки измерения скорости u не более 3% и пульсационной составляющей скорости u' до 20%.

На теплообмен и структуру течения в выемке оказывают влияние параметры набегающего потока, пограничного слоя, форма и размеры выемки. В безразмерном виде это будут длина выемки $l_1^* = l/h$, $l_2^* = l/\delta$ или диаметр $d^* = d/\delta$, глубина $h^* = h/d$, ширина $w^* = w/h$, толщина пограничного слоя перед выемкой $\delta^* = \delta/h$.

Схема течения в выемке открытого типа показана на фиг. 1. Поток открывается от передней кромки выемки в точке S (рассматривается двумерная выемка или плоскость симметрии трехмерной выемки) и присоединяется к задней кромке выемки в точке R . В верхней части выемки образуется струйный слой смешения. Линия постоянного



Фиг. 1. Схема обтекания сверхзвуковым потоком выемки открытого типа: 1 – внешний поток, 2 – слой смешения, 3 – циркуляционное течение, 4 – угловые вихри, 5 – скачок уплотнения, S – точка отрыва, R – точка присоединения, g – разделяющая линия

расхода, или разделяющая линия, приходит в критическую точку на задней кромке выемки, где и возникают максимальные давления и тепловые потоки. Для сверхзвуковых течений разделяющая линия близка к прямой, соединяющей переднюю и заднюю кромки выемки.

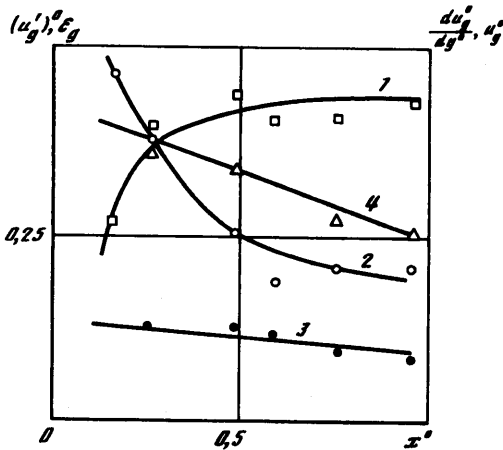
В относительно неглубоких выемках ($l_1^0 = 1$, $w^0 = 1$) наблюдается один большой вихрь циркуляционного течения и два маленьких угловых вихря. Один – у нижней передней части выемки, другой – у задней. В более глубоких выемках наблюдается два и более вихря. В трехмерных выемках были обнаружены вихревые структуры вблизи боковых поверхностей, идущие на всю глубину выемки. У задней кромки выемки возникает скачок уплотнения.

Начальный пограничный слой, образовавшийся на поверхности перед выемкой, существенно влияет на слой смешения над выемкой и на параметры в точке присоединения разделяющей линии, т.е. на максимальное давление и тепловые потоки. На фиг. 2 показаны изменения вдоль выемки ($x^0 = x/l$) средней скорости $u_g^0 = u_g / u_1$ (кривая 1) на разделяющей линии, градиента скорости du_g^0 / dy^0 (кривая 2), где $y^0 = y/\delta$, пульсационной составляющей скорости $(u_g')^0 = u_g' / u_1$ (кривая 3) и интенсивности турбулентности $\epsilon = u' / u_g$ для цилиндрической ($d^0 = 1$) и квадратной ($l/w = 1$) выемки при $M_1 = 2,9$ и $\delta^0 = 0,3$. Данные для выемок совпали. На разделяющей линии достигаются максимальные градиенты скорости и ее пульсационной составляющей. При этом, как и в слое смешения в струйных течениях, величина градиента скорости уменьшается с утолщением вязкого слоя.

Сравнение результатов измерения максимальной пульсационной составляющей скорости на разделяющей линии в выемке с аналогичными для струйного слоя [1–7] показывает незначительное их различие [$(u_g')^0 \approx 0,15$.]

Важным параметром при обтекании выемки сверхзвуковым потоком является величина давления в области присоединения слоя смешения к задней кромке выемки. Именно здесь возникает максимальное давление, превышающее в 2–2,5 раза статическое давление внешнего потока, которое определяет не только максимальные силовые нагрузки, но и самые высокие конвективные тепловые потоки.

Исследование давления в окрестности точки присоединения R разделяющей линии слоя смешения (фиг. 1), где происходит полное торможение газа, были проведены на кольцевых осесимметричных выемках при $M_1 = 3$, $\delta^0 = 0,3$ и $1,2$, $l^0 = 0,5–9$, $Re = = 1,5 \cdot 10^7$. Максимальное давление на задней кромке выемки p_R определялось по



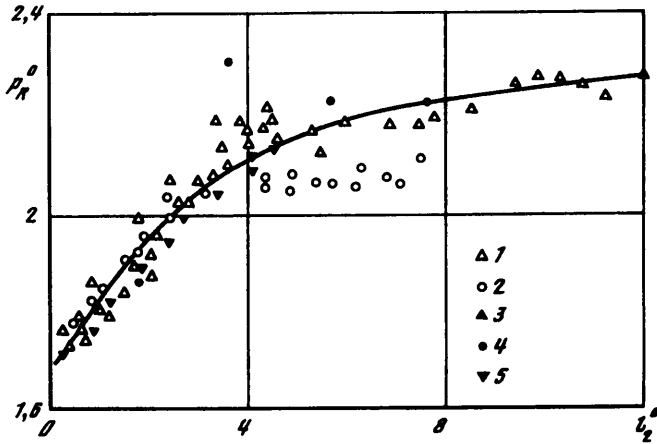
Фиг. 2. Изменение скорости (1), градиента скорости (2), пульсационной составляющей скорости (3) и интенсивности турбулентности (4) на разделяющей линии тока в слое смешения в выемке

результатам измерений в двух ближайших к кромке дренажных точках. На фиг. 3 представлены эти результаты в координатах $p_R^* = p_R / p_1$ и $l_2^* = l_1 / \delta$. Здесь δ выбрана в качестве характерного линейного размера, поскольку профиль скорости и давления в слое смешения зависит от толщины начального пограничного слоя и не зависит от глубины выемки. На фиг. 3 приведены данные из [8], полученные для двумерных выемок при $M_1 = 2,9$, $\delta^* = 0,5$; 1,6 и 2,2. Несмотря на значительный разброс данных, в качестве первого приближения в расчетах, по-видимому, можно воспользоваться кривой 1, дающей при $M_1 = 3$ среднюю величину p_R^* для выемок открытого типа. В интервале $0 < l_2^* < 4 p_R^*$ резко возрастает, затем медленно увеличивается и при $l_2^* = 12$ достигает максимальной величины $p_R^* = 2,3$. Это объясняется тем, что влияние толщины начального пограничного слоя на профиль скорости и давление в слое смешения распространяется примерно на 10 его величин, т.е. оно существенно для коротких выемок или для наличия толстого пограничного слоя.

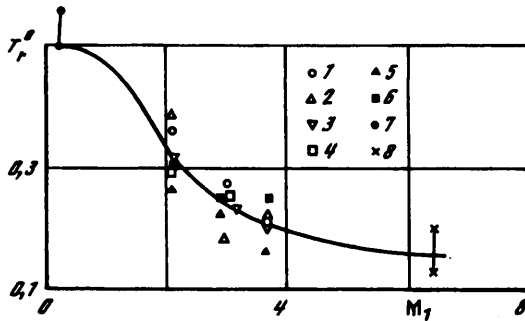
Температура газа T_r была измерена вдоль оси цилиндрической выемки ($h^* = 0,25-2$; $\delta^* = 0,3$, $M_1 = 2,1$; 2,9; 3,7; $Re = 3 \cdot 10^6$) в плоской поверхности при термостатированной стенке выемки ($0,5 \leq T_w / T_0 \leq 0,9$), где T_w – температура стенки выемки, T_0 – температура торможения внешнего потока. Эксперименты показали, что ниже слоя смешения температура газа постоянна. Величина T_r зависит от температурных условий: температуры торможения внешнего потока T_0 , температуры поверхности перед выемкой T_{w1} , температуры стенки выемки T_w и M_1 . Характерная особенность циркуляционных течений – зависимости температуры газа от температуры поверхности, около которой он циркулирует. Поэтому если поверхность перед выемкой теплоизолирована, то безразмерным параметром является относительная избыточная температура $T_r^* = (T_r - T_w) / (T_0 - T_w)$. На фиг. 4 приведена зависимость T_r^* от M_1 . Использование дополнительных данных из [9, 10] позволяет предложить для зависимости $T_r^* = f(M_1)$ простую эмпирическую формулу, которая проще выглядит, если вместо M_1 использовать коэффициент скорости λ (кривая 1)

$$T_r^* = 0,17 + 0,31 \cos^{2,5} \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda_{\max} - 1} \frac{\pi}{2} \right)$$

Большой практический интерес представляет изучение течения и теплообмена в выемках цилиндрической и конической формы, имитирующих сопла струйного органа управления сверхзвукового реактивного аппарата. Их ось может быть перпендику-



Фиг. 3. Максимальное давление на задней стенке выемки: $M_1 = 3$; 1 - $\delta^\circ = 3$; 2 - 1,2 [8]; $M_1 = 2,9$; 3 - $\delta^\circ = 0,5$; 4 - 1,6; 5 - 2,2

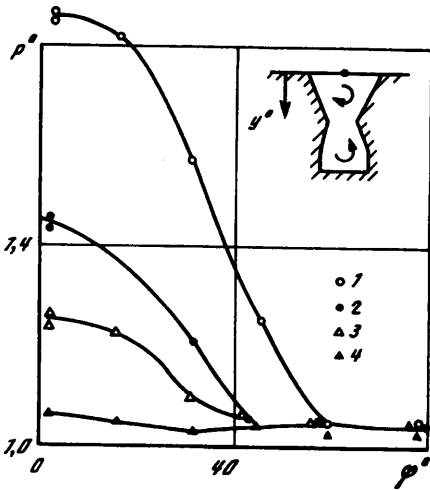


Фиг. 4. Температура газа в выемке. Цилиндрическая: 1 - $h^\circ = 2,5$; 2 - 0,5; 3 - 0,833; 4 - 1,0; 5 - 1,5; 6 - 2,0; прямоугольная: 7 - $l_1^\circ = 0,5-1$; 8 - 10 [9]

лярна поверхности или наклонена по отношению к направлению скорости потока, обтекающего поверхность аппарата.

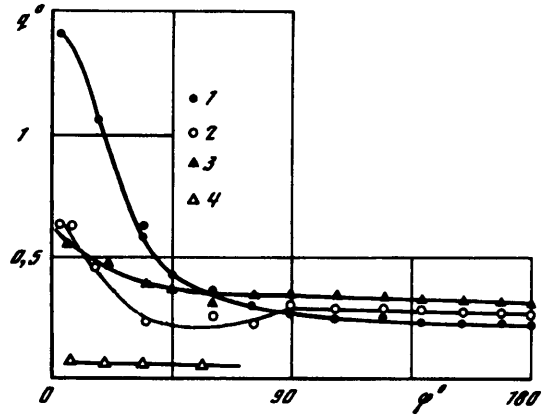
На фиг. 5 показано типичное распределение давления p° по поверхности выемки в виде конического сопла, обтекаемого потоком с $M_1 = 2,9$, $\delta = 0,1$. Кривые построены в плоскостях, перпендикулярных оси выемки и лежащих на различных расстояниях $y^\circ = y/d$ от верхнего края выемки. Угол φ отсчитывался от задней кромки выемки, от точки, лежащей в плоскости симметрии. Изучение структуры течения с помощью маслосажевого покрытия поверхности показало, что в выемке данной формы, где имеется критическое сечение сопла, возникают два вихря: один ниже горла, другой выше. Наибольшее давление наблюдается на задней поверхности выемки, а максимальное - у ее задней кромки в области присоединения разделяющей линии и близко к аналогичному значению для плоской выемки (фиг. 4). Зона повышенного давления распространяется от кромки в обе стороны плоскости симметрии на $\varphi = \pm 30^\circ$. По глубине выемки давление быстро убывает и на ее дне оно практически постоянно.

Распределение теплового потока $q^\circ = q/q_1$ по поверхности этой выемки показано на фиг. 6. Величина q_1 измерялась на стенке в свободном потоке перед выемкой. Тепловой поток достигает наибольших значений на задней стенке. Наиболее теплонапряженный участок занимает интервал $\varphi = \pm 30^\circ$. На дне выемки тепловой поток слабый и практически одинаков по всему дну.



Фиг. 5

Фиг. 5. Давление на поверхности осесимметричной выемки: $M_1 = 2,9$, $d^\circ = 0,3$; $l - \gamma^\circ = 0$; 2 - 0,063; 3 - 0,16; 4 - 0,29



Фиг. 6

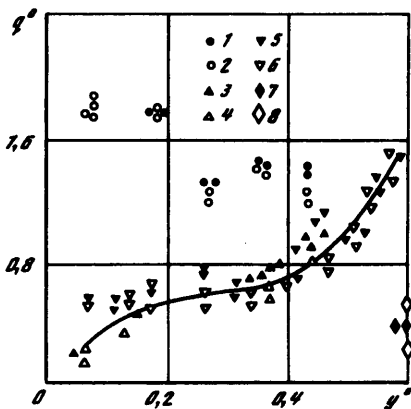
Фиг. 6. Тепловой поток на поверхности осесимметричной выемки: $M_1 = 2,9$; $\delta^\circ = 0,3$; $l - \gamma^\circ = 0,17$; 2 - 0,35; 3 - 0,55; 4 - дно

Большой практический интерес вызывает влияние угла наклона осесимметричной выемки на теплообмен. Эксперименты показали, что отклонение выемок от вертикали назад по потоку ($\gamma > 90^\circ$) оказывает слабое влияние на тепловой поток к ее поверхности, в то время как отклонение навстречу потоку ($\gamma < 90^\circ$) вызывает изменение картины течения и теплообмена. Вдоль наклоненной вперед задней стенки происходит интенсивный заброс горячего газа в выемку, что приводит к существенному росту теплового потока в глубине выемки и на ее дне. На фиг. 7 приведено распределение q° по поверхности осесимметричной выемки при $M_1 = 2,1$, $\gamma = 40^\circ$ для $\phi = 0, 90, 180^\circ$ и дна для $Re = 4 \cdot 10^6$ и $9 \cdot 10^6$. Изменение среднего значения q° по поверхности в зависимости от M_1 и ϕ представлено ниже:

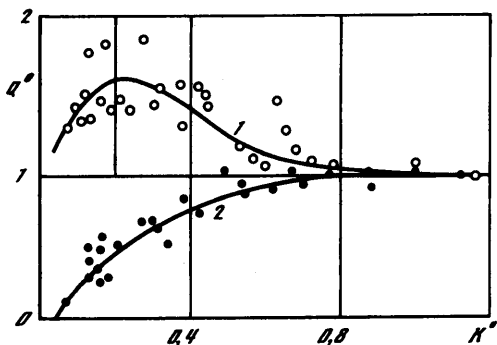
M_1	2,1	2,1	2,1	2,9	2,9	2,9	3,7	3,7	3,7
γ°	40	90	180	40	90	180	40	90	180
q°	0,4	0,12	0,04	0,22	0,4	0,5	0,4	0,16	0,9

Исследования влияния трехмерности выемки показали, что для достаточно широких выемок картина течения в плоскости симметрии такая же, как в плоских выемках. В отличие от двумерных в трехмерных выемках, например прямоугольных, наблюдаются расходные колебания массы газа, циркулирующей в выемке, вследствие втекания и вытеснения газа вдоль задней и боковых кромок выемки. Эти процессы приводят к повышению давления на дне выемки. При $w^\circ = 6-8$ и $M_1 = 2,9$ оно достигает 20%.

Возникновение вихревых структур в задней части выемки вызывает усиление теплообмена в этой области, одновременно оно оказывает экранирующее действие на конвекцию газа в передней части выемки. В итоге при постепенном уменьшении ширины выемки q° на задней части дна сначала возрастает по сравнению с двумерным тепловым потоком q_2° , а затем для узких выемок резко снижается. Для выявления влияния боковых стенок на отрывное течение в выемке было проведено сравнение тепловых потоков на оси симметрии на дне трехмерной и двумерной выемок (фиг. 8).



Фиг. 7



Фиг. 8

Фиг. 7. Тепловой поток на поверхности выемки, наклоненной навстречу потоку: $\gamma = 40^\circ$; $M_1 = 2,1$; 1, 2 – $\phi = 0$; 3, 4 – 90° ; 5, 6 – 180° ; 7, 8 – дно; 1, 3, 5, 7 – $Re = 4 \cdot 10^6$; 2, 4, 6, 8 – $Re = 9 \cdot 10^6$

Фиг. 8. Влияние трехмерности на максимальный (1) и минимальный (2) тепловые потоки на дне выемки

По вертикальной оси отложено $Q^\circ = q_3/q_2$, по горизонтальной – отношение $K^\circ = (w/l)[h/(h + \delta)]$, позволяющее учесть влияние толщины пограничного слоя. Эксперименты проведены при $l^\circ = 2-12$, $w^\circ = 0,5-8$, $\delta^\circ = 0,4-2$, $M_1 = 2,9$, $Re = (3-7) \cdot 10^6$. Максимальный тепловой поток (кривая 1) у задней стенки за счет изменения структуры течения может увеличиваться до 50%, в то же время минимальный тепловой поток (кривая 2) у передней кромки на дне резко снижается. При $K^\circ > 0,8$ влияние стенок практически не обнаруживается.

Заключение. Исследования с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости показали, что параметры слоя смешения в выемках открытого типа, размеры которых соизмеримы по трем направлениям, совпадают с параметрами слоя смешения в струйном потоке. Определяющую роль в формировании потока в выемке играет максимальное давление в области присоединения слоя смешения к задней кромке выемки. При $M_1 = 3$ оно в 2,5 раза больше статического давления в потоке. На его величину влияет толщина пограничного слоя на передней кромке выемки и ее продольная длина. Оба эти параметра надо учитывать в случае наличия толстого пограничного слоя или очень узкой выемки.

Для осесимметричных выемок наибольшие давления и тепловые потоки наблюдаются на задней стенке выемки и занимают сектор $\pm 30^\circ$ по обе стороны от плоскости симметрии. При $M_1 = 2,9$ максимальное давление превышает давление на стенке в 2 раза, а тепловой поток в 1,4 раза. На дне выемки давление и тепловые потоки – как на стенке во внешнем потоке. Наклон оси выемки вперед по потоку увеличивает максимальное давление и тепловой поток при угле 40° на 25%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. М.: Машиностроение, 1969. 397 с.
2. Авиационная акустика / Под ред. А.Г. Мунина, В.Е. Квитки. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
3. Пател Р. Экспериментальное исследование плоской зоны смешения // Ракетн. техника и космонавтика. 1973. № 1. С. 79–84.

4. *Troutt T.R., McLaughlin D.K.* Experiments on the flow and scoustic properties of a moderate-Reynolds-number supersonic jet // *J. Fluid Mech.* 1982. V. 116. P. 123–156.
5. *Morris P.J.* Turbulence measurements in subsonic and supersonic axisymmetric jets in a moving stream // *AIAA Paper.* 1976. № 25. 14 p.
6. *Варфоломеев И.М.* Гидродинамика и теплообмен турбулентного потока в зонах отрыва, образованных прямоугольными полостями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань: Изд-во КАИ, 1984. 21 с.
7. *Samimy M., Petrie H.L., Addy A.L.* A study of sompressible turbulent reattaching free shear layers // *AIAA Journal.* 1986. V. 124. № 2. P. 261–267.
8. *Charwat A.F., Ross J.N., Dewey F.C., Hitz J.A.* An investigation of separated flows. Pt 1. The Pressure Field // *J. Aerospace Sci.* 1961. V. 28. № 6. P. 457–470.
9. *Хан М.* Экспериментальное исследование отрывного течения в выемке, обтекаемой гиперзвуковым потоком // *Ракетн. техника и космонавтика.* 1969. № 6. С. 124–132.
10. *Хаген Р., Данак А.* Теплообмен в области отрыва турбулентного пограничного слоя при обтекании впадины // *Теплопередача.* 1967. № 4. С. 62–69.

Москва

Поступила в редакцию
20.I.1997