

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТРЕХМЕРНОГО СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ

АНЦУЛОВ А. В., ШУИНОВ А. В.

Одной из важных практических задач современной газовой динамики является задача о сверхзвуковом струйном течении в сквозном цилиндрическом канале. Осесимметричный случай такого вида течения достаточно широко исследован [1-9], однако во многих технических устройствах возможны отклонения сопла от осесимметричного положения в канале.

В данной работе представлены результаты экспериментального и численного исследования сверхзвукового трехмерного течения, возникающего при асимметричном расположении сопла в цилиндрическом канале. Получена картина течения идеального газа в канале и распределение параметров по его поверхности при параллельном смещении и повороте осей осесимметричного сопла и цилиндрического канала. Показано, что отклонение сопла в канале приводит к существенному увеличению локальных значений давлений на стенках канала по сравнению с осесимметричным случаем и появлению значительной боковой силы, действующей на канал. Диапазон изменения определяющих параметров следующий: число Маха на срезе сопла $M_a = 2,17 \div 3,0$; степень нерасчетности струи $n = p_a/p_n = 0,5 \div 7,0$ (p_a и p_n — статические давления на срезе сопла и в окружающем пространстве); отношение удельных теплоемкостей γ постоянно и равно 1,4; температура торможения струи и окружающей среды $T_0 = T_{0n} = 290$ К; отношение радиуса канала R_k к радиусу среза сопла R_a $R_k/R_a = 1,5 \div 3,0$; отношение величины параллельного смещения осей сопла канала и канала к величине зазора $h = \Delta(R_k - R_a)^{-1} = 0 \div 0,5$; угол между осями сопла и канала $\delta = 1 \div 3^\circ$, отношение длины канала к его диаметру $L/d_k = 2 \div 8$.

1. Эксперименты проводились на установке непрерывного действия барокамерного типа. Постоянное давление в барокамере поддерживалось с помощью трехступенчатого эжектора. Сопло жестко крепилось в барокамере установки. Канал размещался на трехкомпонентных тензосах, закрепленных на координатнике, который перемещался относительно сопла. В качестве датчиков использовались проволочные тензорезисторы. Для регистрации сигналов с тензодатчиков использовался прибор АР-4. Описание такого типа тензосах приведено в работе [10]. Экспериментально исследовались три конических сопла с полуоткрытыми раскрытия сверхзвуковой части $\theta_a = 13, 10$ и 17° и числами Маха на срезе $M_a = 2,17, 2,60$ и $3,0$ соответственно. В плоскости расположения осей сопла и канала по противоположным образующим канал был препарирован приемниками статического давления. Давление в приемниках регистрировалось с помощью групповых регистрирующих манометров.

2. Как известно, при истечении сверхзвуковой струи в сквозной цилиндрический канал возможны два характерных режима течения: режим эжектирования, когда струя не достигает стенок канала, а подсасывает окружающий ее воздух, и режим присоединения, при котором струя взаимодействует со стенками канала. В первом случае в зазоре канал — сопло возникает течение вниз по потоку, а во втором — существует слабое возвратное течение [5]. Реализация того или иного режима для достаточно большой длины канала зависит в основном от двух параметров течения: степени нерасчетности n струи и величины относительного радиуса канала R_k/R_a .

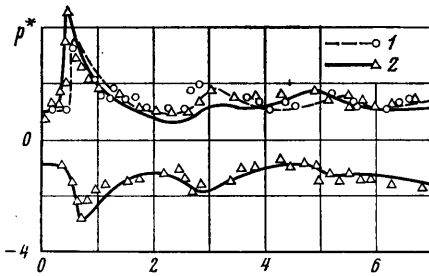
В районе взаимодействия сверхзвуковой струи со стенкой канала при повороте потока газа вдоль стенки формируется интенсивный скачок уплотнения. Этот скачок, отражаясь поочередно от стенок, образует характерную для режима присоединения систему скачков, которая в свою очередь обуславливает систему последовательных максимумов в распределении давления по стенкам канала [1]. На режиме эжектирования из-за отсутствия взаимодействия струи с каналом подобные максимумы в распределении давления не возникают. Таким образом, с точки зрения локальных силовых нагрузок режим присоединения является более напряженным по сравнению с режимом эжектирования. При отклонении сопла в канале, которое можно представить как сумму поворота и параллельного смещения, симметричная по всем образующим прежде картина распределения давления искажается. С увеличением h первый максимум давления на ближней к соплу образующей канала приближается, а на дальней — отодвигается от среза сопла, фиг. 1, 2. Здесь и далее давление (p^*) отнесено к давлению в окружающем пространстве, а все линейные размеры (L^*), отсчитываемые от среза сопла, — к диаметру канала.

Результаты, приведенные на фиг. 1, 2, получены при следующих значениях параметров: $M_a = 2,17$; $n = 7$; $R_k/R_a = 2,05$; $\gamma = 1,4$; $\theta_a = 13^\circ$. Эпюра, расположенная выше оси абсцисс, относится к ближней к соплу образующей, а нижняя — к дальней. Точки 1, 2 и 3 соответствуют параллельному смещению оси сопла на величину $h = 0; 0,16; 0,48$.

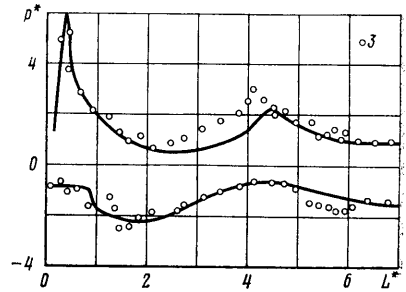
Соответственно ведут себя и последующие максимумы давления, в результате чего второй и третий максимумы на ближней к соплу образующей канала и третий и четвертый на дальней — сближаются (фиг. 1, 2). Образуется область повышенного

давления поочередно: то в районе ближней к соплу образующей, то в районе дальней. Такой характер в распределении давления приводит к появлению боковой силы, действующей на канал.

Величина боковой силы, действующей на канал, зависит от многих параметров, в первую очередь, от режима течения. На фиг. 3 представлена зависимость боковой силы, действующей на канал, от степени нерасчетности истекающей из сопла струи при следующем значении определяющих параметров: $M_a=2,6$; $R_k/R_a=2,15$; $h=0,218$; $\gamma=1,4$; $\theta_a=10^\circ$. На фиг. 3 ($x^*=7$) и далее величина боковой силы (Y^*) относится к



Фиг. 1



Фиг. 2

тяге сопла, определяемой по формуле

$$Q = F_a p_n (\gamma M_a^2 n + n - 1)$$

где F_a — площадь среза сопла и измеряется в процентах.

Видно, что с увеличением степени нерасчетности, при наступлении режима присоединения величина боковой силы резко возрастает. Таким образом, режим присоединения является более напряженным по сравнению с режимом эжектирования и с точки зрения суммарных боковых нагрузок, именно поэтому в настоящей работе в основном исследовался режим присоединения.

Отмеченный ранее характер перемещения области повышенного давления по длине канала за срезом сопла приводит при конечной длине канала к колебательной знакопеременной зависимости боковой силы от расстояния, отсчитываемого от среза сопла до выходного сечения канала. В настоящей работе с помощью тензометрических измерений боковых сил была получена указанная зависимость при $M_a=3$; $n=3$; $\gamma=1,4$; $L/d_k=7$; $R_k/R_a=1,72$; $\theta_a=17^\circ$. Точки 1 и 2 на фиг. 4, а соответствуют параллельному смещению оси сопла на величину $h=0,25$ и $0,5$ соответственно. Своего максимального значения эта зависимость достигает в ближней к срезу сопла области течения и соответствует такому положению среза сопла и выходного сечения канала, когда струя, вытекающая из сопла, взаимодействует с каналом в районе ближней к соплу образующей и не попадает на канал в районе дальней. Отметим здесь же, что существуют такие положения сопла в канале ($3 < x/d_k < 5,5$), когда сила, приложенная к каналу, действует в направлении, противоположном смещению сопла.

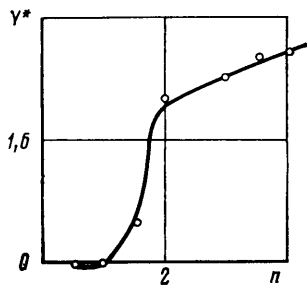
3. В работе проводился расчет трехмерного сверхзвукового течения в цилиндрическом канале на режиме присоединения с помощью стационарного аналога метода С. К. Годунова [11], который хорошо зарекомендовал себя при решении аналогичных задач [12, 13].

Течение идеального (невязкого и нетеплопроводного) газа рассчитывалось от выходного среза сопла, где оно аппроксимировалось течением от сверхзвукового источника. Струя вытекала из сопла в затопленное пространство с заданным давлением, которое приравнивалось давлению в окружающем установившемся пространстве. Подобное допущение при сообщении зазора канал — сопло с окружающим пространством со стороны входа сопла в канал, вследствие слабого возвратного течения в зазоре канал — сопло, представляется вполне допустимым. Граница струи рассчитывалась последовательно на каждом шаге из условия равенства давления на границе струи давлению в окружающем пространстве, а после взаимодействия на стенках канала выполнялось условие непротекания. Расчет взаимодействия струи с каналом проводился аналогично работам [12, 13]. Все расчеты проводились на БЭСМ-6. Время расчета типичного варианта с сеткой 15×30 составляло 1,5–2 часа.

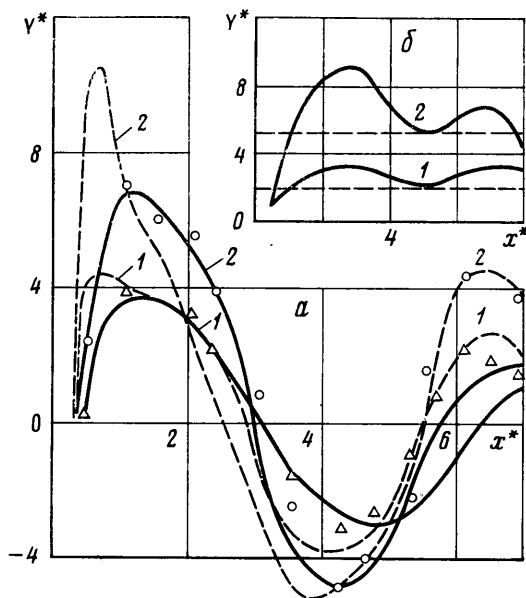
Допустимость указанной выше постановки задачи подтверждается удовлетворительным согласием расчетных и экспериментальных распределений по стенкам канала (фиг. 1, 2). Особенно хорошее соответствие получено в ближней к срезу сопла области течения. Отличие расчетных и экспериментальных данных при больших x

связано с погрешностью счета. Зная распределение давления по стенкам, можно рассчитать силу, действующую на канал в районе сверхзвукового течения. На фиг. 4, а сплошной линией нанесены результаты расчета, где они сравниваются с приведенными выше экспериментальными данными по величине боковой силы в зависимости от расстояния от среза сопла до выходного сечения канала.

Здесь уместно остановиться на обосновании вышеуказанного сравнения. Как было показано выше, боковые силы, действующие на канал на ре-



Фиг. 3



Фиг. 4

жиме эжектирования, малы, что связано с дозвуковым характером течения около стенок канала. Естественно предположить, что и на режиме присоединения силы, приложенные к каналу в зазоре канал — сопло, где существует слабое дозвуковое течение, малы. Это предположение позволяет провести сравнение рассчитанной боковой силы, приложенной к каналу только в районе сверхзвукового течения, с экспериментально измеренной боковой силой, действующей на весь канал конечной длины (фиг. 4, а).

Удовлетворительное соответствие вышеуказанных сил в достаточно широком диапазоне изменений положения сопла в канале позволяет говорить как о хорошей работе метода, так и о правильности сделанных допущений.

В целом удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных позволило провести цикл параметрических расчетов.

4. Численный расчет позволяет получить практически полную картину течения. Так, на фиг. 5 приведено распределение линий равных чисел Маха в плоскости симметрии с шагом $\Delta M = 0,4$ в начале течения, до скачка уплотнения, и $\Delta M = 0,1$ после скачка при $M_a = 2,55$; $\theta_a = 12^\circ$; $n = 7$; $R_h/R_a = 2,2$; $\gamma = 1,4$ и $h = 0,16$. Хорошо прослеживаются в виде сгущений линии равных чисел Маха скачки уплотнения, возникающие при взаимодействии струи с каналом. Приведенное распределение позволяет, например, объяснить причину возникновения максимумов давления на стенках канала, их форму и зависимость ее от различных определяющих задачу параметров. Остановимся лишь на некоторых выявленных особенностях течения.

Как уже отмечалось, большое влияние на характер течения в целом и на величину силовых нагрузок оказывает первый скачок уплотнения, возникающий при взаимодействии струи со стенкой канала. Особенно важно знать положение и интенсивность этого скачка уплотнения, так как, во-первых, именно в этом районе возникают максимальные местные силовые нагрузки, а во-вторых, от интенсивности и положения первого скачка уплотнения зависят интенсивность и положение последующих, вторичных скачков уплотнения.

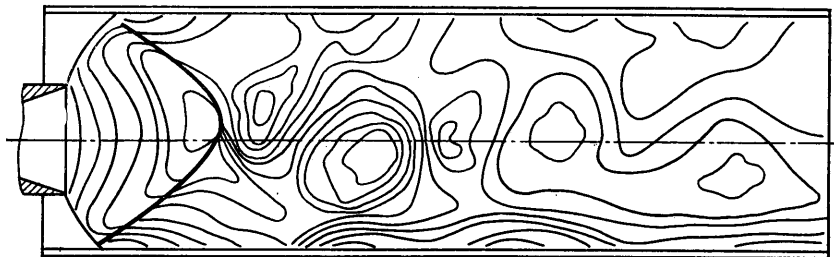
В результате проведенных параметрических исследований удалось установить, что интенсивность первого скачка уплотнения сильно зависит от степени нерасчетности струи, величины относительного смещения и слабее от числа Маха на срезе сопла, угла поворота, полуугла раскрытия сопла, адиабатической постоянной истекающего газа.

Большой интерес представляет собой зависимость боковой силы, действующей на канал, от расстояния между срезом сопла и выходным сечением канала. Эта зависимость, как уже отмечалось, носит колебательный знакопеременный затухающий характер, но в отличие от распределения давления боковая сила изменяется плавно с увеличением x .

Боковая сила получается в результате интегрирования давления по стенкам канала, поэтому величина боковой силы зависит от величины и положения максимумов

давления. Например, известно, что с увеличением степени нерасчетности струи возрастает величина максимальных давлений, что приводит к увеличению максимального значения боковой силы, действующей на канал (фиг. 3). С уменьшением относительного радиуса канала величина максимальной боковой силы уменьшается. Это обстоятельство связано, с одной стороны, с уменьшением площади стенок канала, а с другой — со сближением по продольной координате максимумов давления на противоположных образующих при уменьшении радиуса канала. С увеличением величины параллельного смещения h и угла поворота сопла δ боковая сила возрастает практически линейно.

В целом наиболее сильно в исследованных диапазонах параметров на величину боковой силы, действующей на канал, влияют значения h , n , M_a . Отметим, что численный расчет дает заниженные по сравнению с экспериментом значения второго



Фиг. 5

и следующих максимумов. Последующая обработка численных результатов, согласно методике [14] (фиг. 4, а, штриховая линия), приводит к лучшему соответствию расчетных и экспериментальных данных при $x > 5d_h$, но в то же время дает завышенные результаты при $x < 5d_h$.

Рассмотрим влияние поворота сопла на величину максимальных давлений и боковых сил, действующих на канал. В отличие от параллельного смещения сопла поворот не приводит к резкому росту максимальных давлений, а величина боковой силы изменяется колебательно с увеличением расстояния от среза сопла до выходного сечения канала и в исследованном диапазоне углов поворота не превышает максимальных значений боковых сил, полученных при смещении. Кривые 1 и 2 на фиг. 4, б соответствуют углам поворота $\delta = 13^\circ$. Результаты на фиг. 4, б рассчитаны при следующих значениях параметров: $M_a = 2,55$; $\theta_a = 12^\circ$; $R_h/R_a = 2,2$; $n = 7$; $\gamma = 1,4$; $L/d_h = 8$. Здесь же штриховой линией нанесены значения боковой составляющей импульса сопла, соответствующие углам поворота $\delta = 1^\circ$ и $\delta = 3^\circ$. Видно, что значение боковой силы может значительно превышать соответствующее значение компоненты импульса.

В заключение отметим, что при небольших отклонениях сопла от осесимметричного положения в канале величина боковой силы Y/Q изменяется пропорционально h и δ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Лейтес Е. А., Нестеров Ю. Н., Хомутов В. А. Распространение сверхзвуковой струи в канале с внезапным расширением.— Тр. ЦАГИ, 1975, вып. 1672, с. 3–14.
2. Благосклонов В. И., Хомутов В. А. Внезапное расширение сверхзвуковой струи в цилиндрическом канале.— Уч. зап. ЦАГИ, 1975, т. 6, № 3, с. 18–24.
3. Давидсон В. Е., Нецшерет П. А., Глинкин Б. А. Об истечении недорасширенной сверхзвуковой струи в цилиндрическую трубу с уступом.— В кн.: Гидроаэромеханика и теория упругости. Вып. 16. Днепропетровск, 1973, с. 38–41.
4. Arrich W. A. Jr., Tipping D. E. Plume induced loading during a tube launch of a free rocket.— AIAA Pap., 1977, № 81, p. 7.
5. Batson J. L., Bertin J. J. Experimental study of flow field produced when an underexpanded rocket exhausts into cylindrical tube.— AIAA Pap., 1973, № 1227, p. 8.
6. Баланин Б. А. Истечение сверхзвуковой струи в каналы различной формы.— Инж.-физ. ж., 1968, т. 15, № 1, с. 91–97.
7. Глогов Г. Ф., Мороз Э. К. Исследование течения газа в цилиндрическом канале при внезапном расширении звукового потока.— Уч. зап. ЦАГИ, 1970, т. 1, № 2, с. 53–59.
8. Акунов В. И. Струйные мельницы. М.: Машиностроение, 1967. 263 с.
9. Гунько Ю. П. Запирание неравномерного потока в канале с трением.— Изв. СО АН СССР. Сер. техн. н., 1976, № 13, вып. 3, с. 71–77.
10. Попова Е. И. Динамометрические устройства для исследования аэродинамических нагрузок.— Тр. ЦАГИ, 1975, вып. 1689, с. 175–184.
11. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Торокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

12. Иванов М. Я., Назаров В. П. Численное решение задачи о «боковом» взаимодействии нерасчетных сверхзвуковых струй идеального газа с плоскостью и друг с другом.— Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1974, т. 14, № 1, с. 179–187.
13. Иванов М. Я., Назаров В. П. Исследование «бокового» взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи идеального газа с поверхностями различной формы.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 6, с. 3–8.
14. Марчук Г. И., Шайдунов В. В. Повышение точности решений разностных схем. М.: Наука, 1979. 319 с.

Москва

Поступила в редакцию
21.VII.1980

УДК 532.526.4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ КРИВОЛИНЕЙНОГО КАНАЛА

БОБОШКО В. А., РЫНДЯ Н. В., ШМЕДРО Ю. А.

При движении жидкости в криволинейных каналах вследствие действия центробежных массовых сил и радиальных сил давления в низкоскоростных пристеночных слоях происходит зарождение и последующее развитие вторичных течений, деформирующих основной поток [1, 2].

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований деформации поля статического давления и касательных напряжений на стенках канала прямоугольного поперечного сечения под влиянием продольной кривизны. Эксперименты проводились в лаборатории аэрогидродинамики Делфтского университета (Голландия) на аэродинамической установке, состоящей из осевого нагнетателя, спрямляющего и успокоительного устройств и рабочего участка, установленного за прямым каналом поперечного сечения $b \times h = 0,45 \times 0,09$ м и длиной 0,89 м. При выбранном соотношении размеров прямого канала и характеристик нагнетателя на входе в рабочий участок обеспечивался турбулентный поток с потенциальным ядром, занимающим примерно 30% площади поперечного сечения. Максимальная скорость в ядре потока составляла 20 м/с, что соответствовало числу Рейнольдса, вычисленному по этой скорости и ширине канала, $120 \cdot 10^3$. Турбулентность потока в ядре не превышала 0,2–0,3%.

Рабочим участком служил криволинейный канал того же поперечного сечения, что и прямой, с углом поворота 90° в горизонтальной плоскости. При этом стенки большего размера располагались вертикально и имели радиусы кривизны 0,40 и 0,49 м.

Криволинейная система координат x, y, z выбрана таким образом, что ось x совпадала с направлением потока и располагалась вдоль выпуклой стенки в горизонтальной плоскости симметрии канала, ось y совпадала с направлением радиуса кривизны, а ось z — нормальна к первым двум и направлена к верхней торцевой стенке. Начало координат выбрано в прямом канале на расстоянии 0,506 м от геометрического начала кривизны. Угловые и продольные координаты мерных сечений и их условные обозначения приведены ниже

Сечение	1	2	3	4	5
$\varphi, ^\circ$	0	0	22,5	45	67,5
$x \cdot 10^3$ м	0	506	663	820	977

Касательные напряжения на стенках канала определялись с помощью трубки «Preston» в соответствии с методикой [3], а также методом [4], основанным на измерении эпор скорости в пристеночных слоях. Следует отметить удовлетворительное согласование результатов, полученных указанными методами и данными [1] для выпуклой стенки вдоль горизонтальной плоскости симметрии. Максимальная ошибка в определении касательных напряжений не превышала 6%.

В качестве измерительной техники использовались термоанемометр с постоянной температурой нити и электрические манометры поплавкового типа.

Полученная информация о распределении статического давления на стенках криволинейного канала представлена на фиг. 1 в виде коэффициента давления $c_p = (p - p_0) / 0,5\rho U_{\max}^2$ где p_0 и $0,5\rho U_{\max}^2$ — статическое давление и максимальный скоростной напор в сечении 1 прямого канала. Для удобства анализа кривые изменения c_p вдоль выпуклой (левая ось $Z = z/h$) и вогнутой стенок и вдоль верхней торцевой стенки (ось $Y = y/h$) в пределах каждого мерного сечения канала совмещены на одной фигуре. Обозначения кривых 1–5 соответствуют номеру мерного сечения, приведенных выше.

Из фигуры следует, что радиальный градиент давления $\partial p / \partial z$ появляется несколько ранее, чем геометрическое начало кривизны канала (сечение 2). По данным