

ОСОБЕННОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ИЗ СОПЛА С КОСЫМ СРЕЗОМ

В. И. ПОГОРЕЛОВ, Г. Б. ЩЕРБАНИНА

(Ленинград)

Приводятся основные результаты численного исследования влияния угла среза сопла на форму границы струи, всякого скачка уплотнения и распределение параметров в пространственной недорасширенной струе. Для решения уравнений газовой динамики невязкого совершенного газа используется нецентральная разностная схема второго порядка точности. Установлены условия, при которых наблюдается частичное совпадение геометрии пространственной струи в радиальных плоскостях и соответствующих этим плоскостям осесимметричных струй.

1. Рассмотрим пространственную сверхзвуковую струю, истекающую в неподвижную окружающую среду с постоянным давлением p_n из сопла с косым срезом, у которого угол Ψ между плоскостью выходного сечения сопла и осью симметрии отличен от прямого.

В последнее время наибольшее внимание уделяется численному и экспериментальному исследованию осесимметричных (например, [1-3]) или пространственных [4] сверхзвуковых струй, истекающих из сопла с плоскостью выходного сечения, перпендикулярной оси сопла, когда $\Psi = 90^\circ$.

Цель настоящей работы — численное исследование структуры и особенностей пространственных сверхзвуковых недорасширенных струй идеального газа, для которых угол наклона плоскости выходного сечения сопла $\Psi < 90^\circ$.

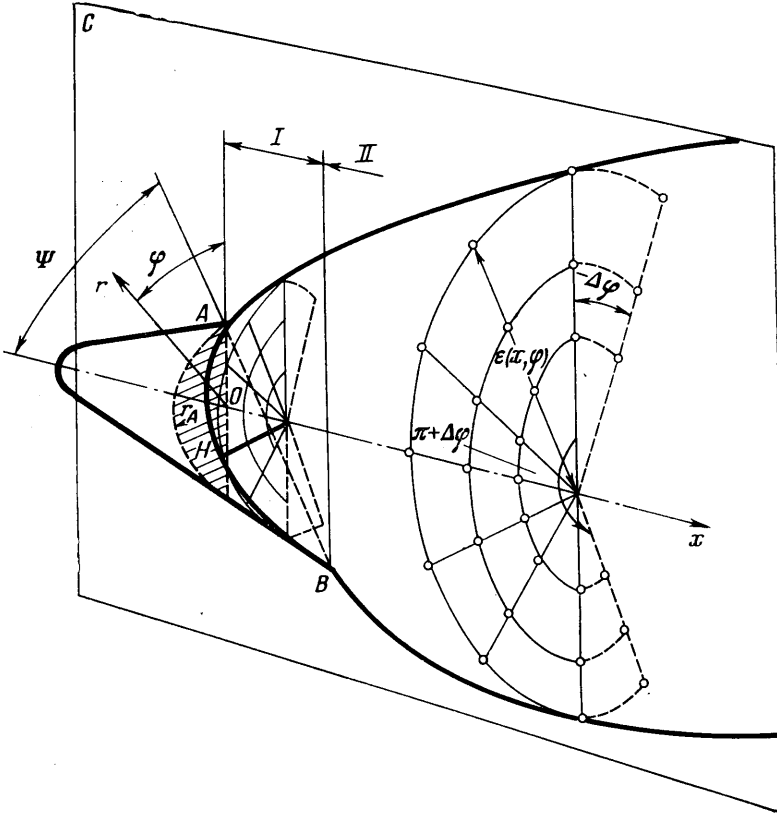
Некоторые экспериментальные результаты, полученные авторами ранее для струй подобного рода, приведены в [5].

Схема рассматриваемой области течения приведена на фиг. 1, где изображена только половина потока ввиду симметрии его относительно радиальной плоскости S , проходящей через ось сопла и его острую и тупую кромку. Начало цилиндрической системы координат x, r, φ (точка O) расположим в плоскости H , перпендикулярной оси сопла и проходящей через его тупую кромку (точка A). От критического сечения и до этой плоскости внутреннее течение в сопле будет осесимметричным и в настоящей работе не рассматривается. В области I , которая включает в себя косой срез сопла, начинает проявляться пространственный характер течения. Границей области является с одной стороны стенка сопла, а с другой — свободная поверхность струи. За острой кромкой сопла (точка B на фиг. 1) — в области II — образуется пространственное струйное течение, ограниченное только свободной поверхностью струи.

В дальнейшем все линейные размеры будем относить к радиусу сопла r_A на тупой кромке, давление p и плотность ρ — к соответствующим заторможенным значениям в критическом сечении сопла, а скорость и ее проекции u, v, w на оси цилиндрической системы координат — к максимальной термодинамической скорости. При исследовании характера течения ограничимся случаем постоянства энтальпии торможения во всей рас-

смаатриваемой области и зоной полностью сверхзвукового течения, в которой отсутствуют местные дозвуковые зоны.

2. Исходные дифференциальные уравнения газовой динамики для цилиндрической системы координат записывались в дивергентном виде, причем введение новой независимой переменной $\xi = r/\varepsilon(x, \varphi)$, где $\varepsilon(x, \varphi)$ – радиальная координата границы струи, позволило преобразовать рассматриваемую область течения в единичный полудилиндр, ограниченный плоскостью, проходящей через точку A (фиг. 1), поверхностью струи (или частично стенкой сопла в области I) и плоскостью симметрии. Система из четырех уравнений в частных производных – неразрывности и количества движения – замыкалась уравнением Бернулли.



Фиг. 1

Полученная система уравнений решалась при помощи нецентральной разностной схемы Мак-Кормака [6, 7], которая на гладких решениях имеет второй порядок точности и позволяет проводить сквозной счет всей области течения без выделения поверхностей разрыва. В плоскости (ξ, φ) вводилась разностная сетка с постоянными шагами по радиальной и угловой координатам, а параметры в узлах разностной сетки определялись шагами по x , начиная от сечения сопла плоскостью H , проходящей через его тупую кромку. Исходные параметры в этом сечении считаются известными. В граничные узлы, принадлежащие срезу сопла, заносились параметры потока, получающиеся после локального расширения в волне Прандтля – Майера. Заметим, что нерасчетность истечения n – отношение давления в выходном сечении кососрезанного сопла к давлению в окружающей среде p_n переменна и достигает своего максимального значения в точке A .

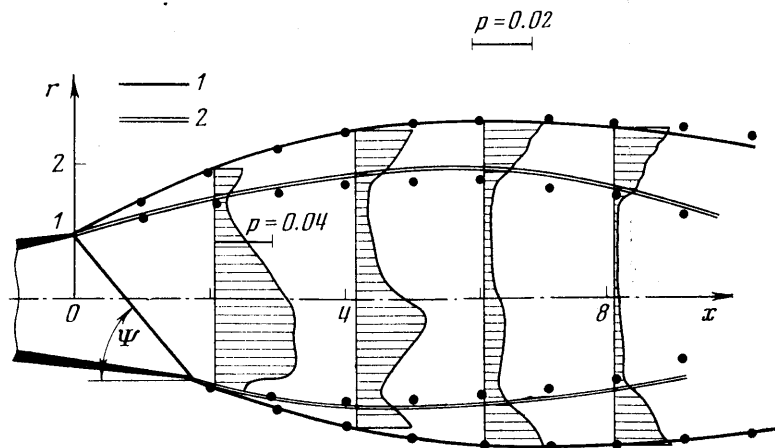
На плоскости симметрии, т. е. на лучах с координатами $\varphi=0$ и π в соответствии с условием непротекания окружная скорость $w=0$, а для определения остальных параметров течения используются отраженные лучи $\varphi = -\Delta\varphi$ и $\pi + \Delta\varphi$.

Давление на свободной поверхности струи считается постоянным и равным давлению в окружающей среде, а при определении ее формы используется условие непротекания.

Параметры течения в общем для всех лучей узле разностной сетки, расположенном на оси x , где $r=0$, определялись при помощи четырехточечной интерполяции в плоскости симметрии с использованием условия равенства нулю нормальной этой плоскости составляющей скорости.

Расчеты проводились в следующем диапазоне изменения параметров $40^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$, $3 \leq n_A \leq 200$, чисел Маха $1.5 \leq M_A \leq 4.8$ и показателей адиабаты $\gamma = 1.19, 1.25, 1.40$ (индекс A соответствует точке A среза — «тупая» кромка).

Установлено, что при $n_A > 12 \div 15$ устойчивый счет в пределах соплового среза невозможен без искусственной вязкости, которая вводилась в разностную схему путем пятиточечного сглаживания газодинамических комплексов. Время счета одного варианта по программе, написанной в машинных кодах для ЭВМ БЭСМ-4, $4 \div 6$ час при сетке $K \times N = 20 \times 30$, где K — число точек на луче, а N — число лучей.



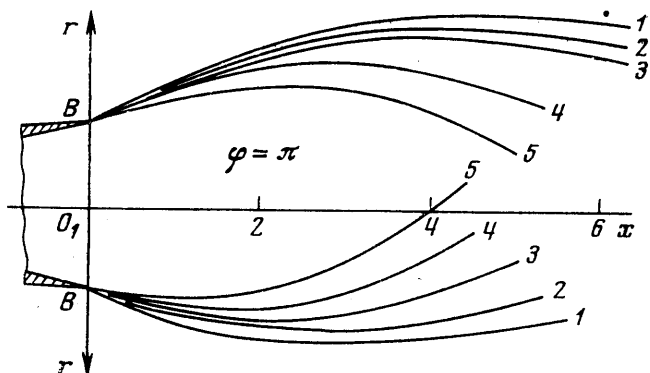
Фиг. 2

3. Остановимся теперь на основных результатах проведенных расчетов.

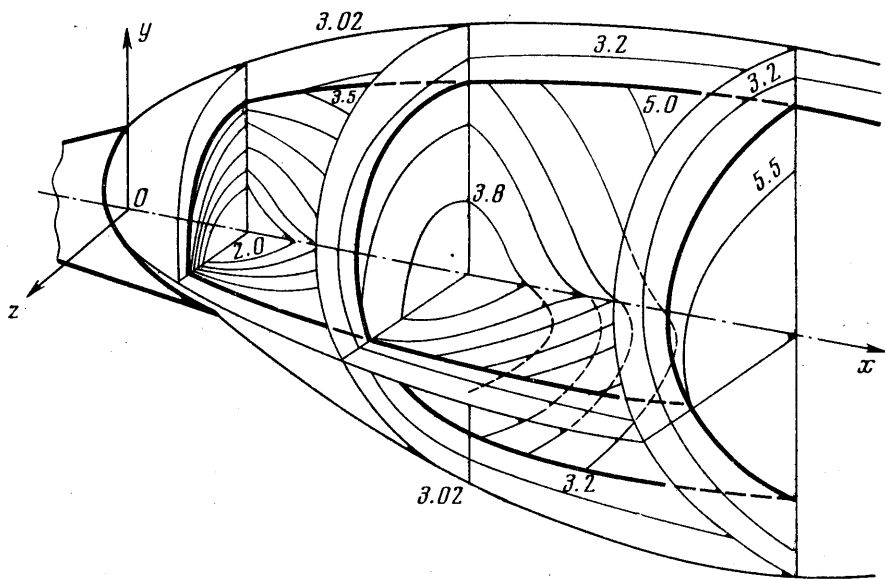
Влияние косога среза выходного сечения сопла в наибольшей степени проявляется в плоскости симметрии, которой принадлежат острая и тупая кромки сопла (точки B и A). На фиг. 2 построена геометрия пространственной струи в плоскости симметрии течения для одного из просчитанных вариантов со следующими исходными данными: $M_A = 2.19$, $\Psi = 50^\circ$, $n_A = 5.5$, $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = 1.4$, где α — угол полураствора конического сопла. Здесь же нанесены безразмерные профили статического давления в нескольких поперечных сечениях струи. Кривыми 1 обозначены линии пересечения плоскости симметрии и поверхности струи, а кривыми 2 — поверхности ударной волны. Форма границы струи определялась в процессе расчета, а положение всякого скачка уплотнения получено путем плавного соединения точек поперечных сечений плоскости симметрии, в которых наблюдается максимальный градиент в распределении параметров потока. Экспериментальные значения координат границы струи и всякого скачка уплотнения, снятые с теневых фотографий потока [5], изображены на фиг. 2 точками. Как и ожидалось, экспериментальные координаты всякого скачка уплотнения несколько смещены относительно расчетных в сторону оси x из-за влияния вязкого слоя смещения, который образуется на свободной поверхности струи. Влияние косога среза проявляется в различной кривизне следов ударной волны и границы струи, сходящих с острой и тупой кромок сопла и приводит к развороту всей струи в направлении срезанной части сопла. В окрестности точки A на плоскости симметрии струя расширяется быстрее и максимум статического давления на его профилях смещен в сторону острой кромки сопла. Однако по мере удаления от выходного сечения

сопла происходит перестройка течения, статическое давление в струе выравнивается и профиль статического давления становится симметричным относительно некоторой повернутой оси струи. Аналогичную тенденцию к выравниванию имеют профили плотности и модуля скорости потока.

Характер влияния угла среза сопла Ψ на форму следа висячего скачка уплотнения со стороны острой кромки сопла (точка B) в плоскости симметрии можно проследить по графикам, построенным на фиг. 3 ($M_B=1.6$,



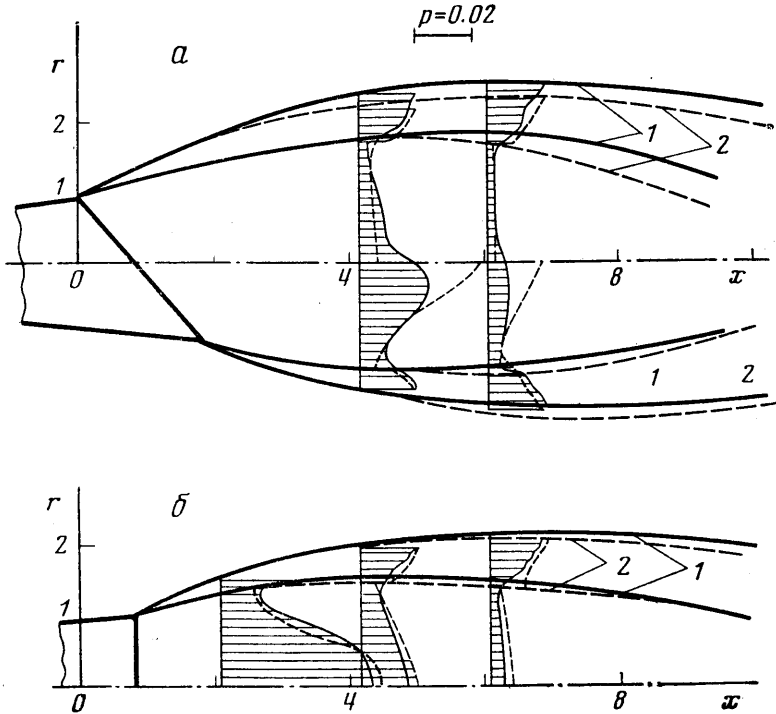
Фиг. 3



Фиг. 4

$n_B=4.94$, $\alpha=1^\circ 30'$, $\gamma=1.40$, $1-\Psi=90^\circ$, $2-70^\circ$, $3-60^\circ$, $4-50^\circ$, $5-40^\circ$. С уменьшением угла среза сопла Ψ висячий скачок и граница струи искривляются более интенсивно в сторону оси x , но на положении границы струи этот процесс сказывается в меньшей степени (на верхней половине фиг. 3 изображены границы струи, на нижней — висячие скачки уплотнения у острой кромки сопла).

Пространственная картина течения, образующаяся при истечении сверхзвуковой струи из кососрезанного сопла, приведена на фиг. 4 ($M_A=1.5$, $n_A=11$, $\Psi=50^\circ$, $\alpha=1^\circ 30'$, $\gamma=1.40$), где xu — плоскость симметрии течения, xz — соответствует расчетной плоскости $\varphi=\pi/2$, плоскости yz перпендикулярны плоскости симметрии и являются поперечными сечениями струи. Линии постоянных чисел Маха (изомахи) построены в указанных плоскостях через $\Delta M=0.3$.



Фиг. 5

Необходимо отметить, что числа Маха, плотность и давление на свободной поверхности струи имеют постоянные значения, так как истечение происходит в неподвижную окружающую среду. В сечениях, перпендикулярных оси x , след границы струи и всякого скачка уплотнения все более приближается к эллипсу по мере удаления от сопла. При больших нерасчетностях истечения, когда дозвуковые области течения возникают на значительных расстояниях от начальной плоскости H , эллипс трансформируется в окружность, центр которой не лежит на оси x .

Общая тенденция к выравниванию течения, установленная для пространственной струи, дает основание предположить, что параметры течения пространственной струи в радиальных сечениях совпадают с параметрами течения осесимметричных струй, имеющих такие же параметры в выходном сечении сопла, как и пространственная струя.

На фиг. 5 приводится типичный пример сопоставления геометрии струй в плоскости симметрии течения $\varphi=0, \pi$ (а) ($M_A=2.19$, $n_A=5.5$) и в плоскости $\varphi=\pi/2$ (б) ($M=2.368$, $n=3.672$) для $\Psi=50^\circ$, $\alpha=6^\circ$, $\gamma=1.40$, где линиями 1 указаны следы границы и всякого скачка уплотнения пространственной струи, а линиями 2 изображены соответствующие координаты осесимметричных струй. В тех же обозначениях на этой фигуре сравни-

ваются профили безразмерного статического давления в поперечных сечениях струй.

Анализ проведенных расчетов показывает, что в плоскости $\varphi = \pi/2$ форма висячего скачка и границы пространственной струи и осесимметричной струи с числом Маха и нерасчетностью, соответствующими этой плоскости, отличаются меньше, чем в плоскости симметрии, и только при углах $\Psi > 60^\circ$ здесь также наблюдается частичное совпадение границ струй.

Аналогичное отличие в параметрах пространственной и осесимметричной струй наблюдается и во всех других радиальных плоскостях.

Установлено также, что на пространственную ориентацию струи кроме угла Ψ существенное влияние оказывает и число Маха M_A на тупой кромке сопла.

При числах $M_A \geq 2.5$ угол поворота струи в плоскости симметрии невелик ($\sim 3^\circ$ при $\Psi = 40^\circ$) и с возрастанием числа Маха падает, поэтому геометрия струи в плоскости $\varphi = \pi/2$ удовлетворительно совпадает с геометрией обычной осесимметричной струи. С уменьшением числа Маха на срезе исходного прямого сопла влияние угла среза Ψ на угол поворота струи усиливается, а плоскость, в которой течение аналогично по геометрии осесимметричному, все более смещается от расчетной плоскости $\varphi = \pi/2$ по мере удаления от выходного сечения сопла.

В заключение авторы благодарят Г. И. Петрова и его сотрудников за всестороннее обсуждение результатов исследования, представленного в настоящей работе.

Поступила 10 I 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверенкова Г. И., Ашратов Э. А., Волконская Т. Г., Дьяконов Ю. Н., Егорова Н. И., Мельников Д. А., Росляков Г. С., Усков В. И. Сверхзвуковые струи идеального газа, ч. 2. Истечение струй в затопленное пространство. М., Изд-во МГУ, 1971.
2. Гинзбург И. П., Собколов Б. Н., Акимов Г. А. Об определении основных параметров течения в сверхзвуковой струе идеального газа. Уч. зап. ЛГУ, Сер. матем. н., 1970, № 357.
3. Авдеевский В. С., Иванов А. В., Карпман И. М., Трасковский В. Д., Юделович М. Я. Течение в сверхзвуковой вязкой недорасширенной струе. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 3.
4. Иванов М. Я., Крайко А. Н., Назаров В. П. Некоторые результаты численного исследования нерасчетных пространственных струй идеального газа. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 4.
5. Погорелов В. И., Щербанина Г. Б. Экспериментальное исследование недорасширенной струи, вытекающей из сопла с косым срезом. Инж.-физ. ж., 1974, т. 27, № 5.
6. MacCormack R. W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering. AIAA paper, 1969, No. 354.
7. Kutler P., Lomax H. Shock-capturing, finite-difference approach to supersonic flows. J. Spacecraft and Rockets, 1971, vol. 8, No. 12. (Рус. перев.: Конечно-разностный метод для сквозного расчета сверхзвуковых течений со скачками уплотнения. Ракетная техника и космонавтика, 1972, т. 10, № 1.)