

УДК 533.6.011.5

© 1995 г. Н. И. ТИЛЛЯЕВА, Е. Я. ШИРОНОСОВА

## О ПРОФИЛИРОВАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СОПЕЛ, РЕАЛИЗУЮЩИХ РАВНОМЕРНЫЙ ПОТОК В КОЛЬЦЕВОМ ВЫХОДНОМ СЕЧЕНИИ

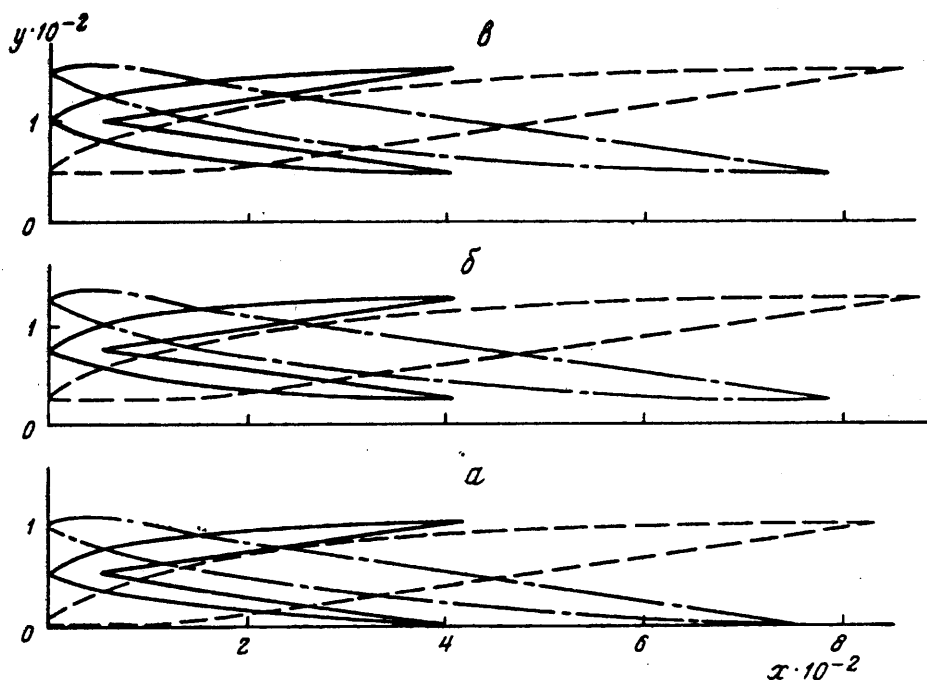
Рассмотрена задача профилирования осесимметричных сопел с центральным телом, реализующих равномерный сверхзвуковой поток с числом Маха  $M_e > 1$  в кольцевом выходном сечении. Одинаковая длина профилируемых внутренней (центрального тела) и внешней стенок сопла получается за счет сдвига вниз по потоку начального излома внутреннего контура, т. е. стенки центрального тела. Для кольцевых сопел с круглым выходным сечением такой сдвиг предложен и опробован в [1, 2].

При  $M_e \gg 1$  в силу известных свойств гиперзвуковых течений [1, 3—8] большую часть длины сопла составляет его «выравнивающий» участок. Минимальная же длина последнего достигается, если осевые координаты концевых точек профилированных внешней и внутренней образующих совпадают (для фиксированных  $M_e$  и высоты выходного сечения эта длина вдвое меньше длины выравнивающего участка сопла с горизонтальной внешней или внутренней стенкой [9—11]). Поэтому для  $M_e \gg 1$  сопла со сдвигом внутреннего излома практически не отличаются по длине от реализующих такой же поток в том же «вертикальном» сечении выхода кольцевых сопел наиболее быстрого разгона [12], не требуя в отличие от последних специального поворота минимального сечения. По этой же причине замена внутреннего контура с изломом гладкой образующей, спрофилированной по методу работы [13], слегка увеличивая протяженность разгонного участка сопла, при  $M_e \gg 1$  практически не сказывается на его полной длине. Напомним, что в [13] начальный участок гладкой нижней стенки строится из решения задачи Коши с данными на горизонтальной линии тока. Данный прием, незначительно усложняя численный алгоритм, позволяет избавиться от итераций (при принятом ниже способе — по координате излома) и таким образом сокращает время счета.

В силу уже упомянутых свойств гиперзвуковых течений можно заранее предсказать неэффективность любых попыток минимизации полной длины гиперзвуковых кольцевых сопел за счет сокращения длины их разгонных участков. Одна из таких попыток, предпринятая в данной работе, сводилась к замене начального цилиндрического участка внутреннего контура участком постоянного давления. Полученное при этом сокращение длины по сравнению с соплами, спрофилированными по методу [1, 2], оказывается весьма незначительным по отношению к полной длине сопла.

В соответствии со сказанным выше для персонального компьютера РС АТ была составлена программа профилирования сверхзвуковых частей кольцевых сопел, реализующих равномерный поток идеального (невязкого и нетеплопроводного) газа с произвольными  $M_e > 1$  в кольцевом или круглом выходном сечении. Расчет велся методом характеристик. Газ предполагался совершенным с постоянным показателем адиабаты  $\kappa$ . Поток в начальном сечении в приводимых ниже примерах равномерный и параллельный оси сопла, число  $M_0 = 1,005$ . В то же время допускается достаточно произвольное задание на некоторой линии начальных данных неравномерного потока с  $M_0 > 1$ .

В программе для заданных начального сечения (его высота принималась за линейный масштаб) и числа Маха  $M_e$  итерациями по осевой координате  $\Delta$  начального излома внутреннего контура строится «двустороннее» сопло с совпадающими координатами  $x$  концевых точек обеих стенок. Здесь и далее,  $x, y$  — цилиндрические координаты,  $y$  — расстояние от оси симметрии, а излом внешней стенки расположен при  $x = 0$ . Варианты программы позволяют строить и «односторонние» сопла с горизонтальной внешней или внутренней стенками и, разумеется, «двусторонние» сопла со стенками



Фиг. 1

разной длины. Работоспособность программы проверялась многочисленными расчетами для разных значений  $M_2$ ,  $\kappa$  и средних радиусов  $y_0$  начального сечения двусторонних сопел (при выбранном линейном масштабе высота начального кольцевого сечения этих сопел  $h_0 = 1$ ).

Типичные результаты расчета представлены на фигуре, на которой для  $\kappa = 1,4$  и  $M_2 = 7$  в плоскости  $x, y$  изображены три группы контуров, которые отвечают трем двусторонним соплам с  $y_0 = 50,28, 75,5$  и  $100,5$ . Группа *a* дает три сопла с круглым выходом. Группы *б* и *в* дают сопла с кольцевыми выходами. Кроме осей координат и контуров нарисованы наклонные прямые — «равномерные» характеристики, приходящие в концевые точки профилированных стенок. Сплошные кривые отвечают двусторонним соплам с внешней и внутренней стенками равной длины. Штриховые линии с длинными штрихами показывают стенки и  $C^+$ -характеристики для односторонних сопел с теми же  $M_2$  и расходом и с горизонтальными внутренними стенками (в случае *a* — это ось симметрии). Пунктирными линиями изображены аналогичные линии для сопел с горизонтальными внешними стенками.

В представленных примерах смещения  $\Delta$  изломов внутренних стенок двусторонних сопел в вариантах *a, б*, и *в* оказались равными  $2,12, 1,07$  и  $0,73$ . В масштабе фигуры все изломы лежат на оси  $y$ , а начальные координаты внешней и внутренней стенок совпадают. Несмотря на малость  $\Delta$  по сравнению с длиной сопла, сдвиг начального излома внутренней стенки для сопел с круглым и с кольцевым выходом обеспечивает более чем двукратное сокращение длины сверхзвуковой части сопла по отношению к соплу с горизонтальной внутренней стенкой и несколько меньшее сокращение длины по отношению к соплу с горизонтальной внешней стенкой. В то же время замена начальных цилиндрических участков внутренних стенок участками постоянного давления приводит в рассматриваемых примерах к дополнительному сокращению длин сопел, не превышающему 0,5% их полной длины.

В созданную программу в зависимости от начального значения числа Рейнольдса включаются подпрограммы расчета ламинарного или турбулентного пограничных слоев, дающие, в частности, поправки координат построенных «идеальных» контуров на толщину вытеснения.

Авторы благодарят А. Н. Крайко за руководство и помощь в работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пирумов У. Г., Рубцов В. А.* Расчет осесимметричных сверхзвуковых кольцевых сопел//Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1961. № 6. С. 15—25.
2. *Межибовская Е. Г., Пирумов У. Г., Рубцов В. А., Сорокина Е. В.* Расчет кольцевых осесимметричных сопел. М.: ВЦ МГУ, 1961. 96 с.
3. *Ладыженский М. Д.* О некоторых свойствах гиперзвуковых течений//Тр. ЦАГИ. 1960. Вып. 778. 22 с.
4. *Ладыженский М. Д.* О течениях газа с большой сверхзвуковой скоростью//Докл. АН СССР. 1960. Т. 134. № 2. С. 296—299.
5. *Ладыженский М. Д.* Анализ уравнений гиперзвуковых течений и решение задачи Коши//ПММ. 1962. Т. 26. Вып. 2. С. 289—299.
6. *Ладыженский М. Д.* О гиперзвуковых течениях в соплах//ПММ. 1965. Т. 29. Вып. 1. С. 99—105.
7. *Ладыженский М. Д.* Пространственные гиперзвуковые течения газа. М.: Машиностроение, 1968. 120 с.
8. *Крайко А. Н., Шеломовский В. В.* О свободном расширении двумерных струй идеального газа//ПММ. 1980. Т. 44. Вып. 2. С. 271—280.
9. *Кацкова О. Н.* Расчет кольцевых сверхзвуковых сопел и диффузоров//Вычисл. математика. М.: ВЦ АН СССР, 1958. № 3. С. 111—129.
10. *Кацкова О. Н.* Расчет равновесных течений в сверхзвуковых соплах. М.: ВЦ АН СССР. 1964. 61 с.
11. *Денисова Н. В.* Численный расчет профилированных кольцевых сопел с центральным телом//Тр. ЦАГИ. 1974. Вып. 1571. 53 с.
12. *Крайко А. Н., Шеломовский В. В.* О профилировании плоских и осесимметричных сопел и каналов, реализующих заданный сверхзвуковой поток в сечении выхода//Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. № 4. С. 94—102.
13. *Верховский В. П., Денисова Н. В., Межиров И. И.* Расчет сверхзвуковой части кольцевых профилированных сопел//Уч. зап. ЦАГИ. 1976. Т. 7. № 3. С. 108—113.

Москва

Поступила в редакцию  
14.XII.1993