

УДК 532.525.6:533.6.011.5

© 1997 г. Ю.М. ДАВЫДОВ, Г.В. МОЛЛЕСОН

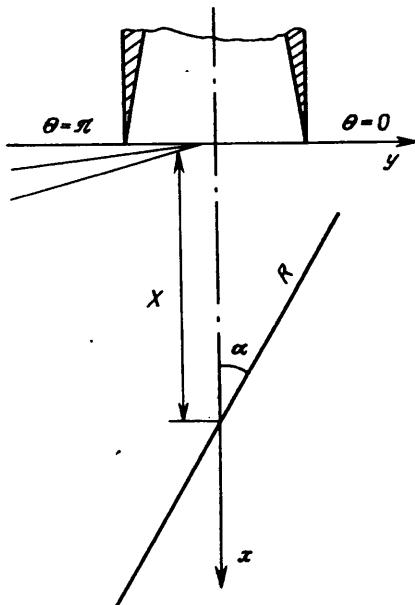
**РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОБТЕКАНИЯ
НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ
НА РЕЖИМАХ С ОТОШЕДШЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ**

Представлены результаты численного исследования натекания сверхзвуковой недорасширенной осесимметричной струи на наклонную плоскость. Показано влияние угла наклона плоскости к оси симметрии струи и ее расстояния от среза сопла, а также числа Маха на срезе сопла и нерасчетности на газодинамические параметры в поле струи и на поверхности. Указаны особенности течения в сжатом слое и на прегrade на основе числа Маха, распределений давления в плоскости симметрии струи и полей давления. Численное моделирование трехмерного течения проведено методом крупных частиц на базе нестационарной системы уравнений Эйлера, записанной в цилиндрической системе координат. Результаты численных расчетов сопоставляются с экспериментальными данными.

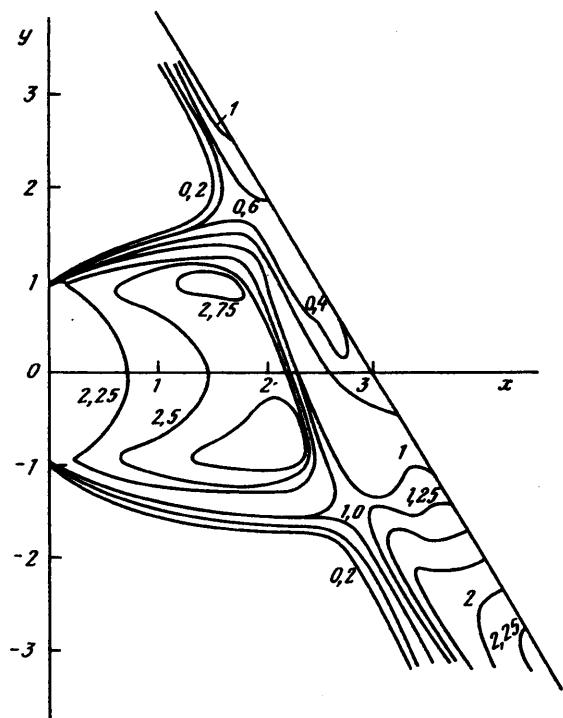
Из всего многообразия течений с взаимодействием сверхзвуковых газовых струй с поверхностями наиболее изучено перпендикулярное натекание сверхзвуковой струи на плоскую преграду. Авторы работ [1–3] подробными экспериментальными исследованиями показали наличие различных типов течений как на безграничной, так и на ограниченной преграде. В зависимости от числа Маха на срезе сопла, нерасчетности струи, расстояния от среза сопла до преграды и ее размера возможны два характерных стационарных режима течения в сжатом слое: течение с плавным безотрывным обтеканием преграды, а также течение, при котором возникает циркуляционная срывная зона. При смещении преграды в область диска Маха свободной струи формируется нестационарное течение, которое характеризуется пульсациями давления на поверхности, смещением скачка уплотнения в струе и мощным акустическим полем.

Последующие численные исследования нормального соударения струи с плоской преградой в двумерной осесимметричной постановке позволили детально описать возможные картины течения в поле струи и на преграде [4–8]. На основе численных исследований нестационарного взаимодействия, представленных в работе [8], проанализированы эпюры давлений на поверхности, размеры срывной зоны, а также амплитудно-частотная характеристика неустойчивого колебательного процесса. Из анализа полей вектора скорости предложена гипотеза о механизме неустойчивого взаимодействия, согласно которой колебательный процесс оказывается возможным вследствие дисбаланса в каждый момент времени расхода газа, втекающего в зону возвратного течения и вытекающего из зоны путем смешения с основным потоком.

Данная работа является развитием численных исследований по взаимодействию струй с преградой и анализирует течение у наклонной плоскости. Наиболее полные экспериментальные исследования по обтеканию наклонной преграды представлены работами [9, 10]. Эти исследования показали, что взаимодействие струи с наклонной плоскостью характеризуется существенной трехмерностью течения. Система скачков уплотнения в поле течения на наклонной преграде создает периферийное давление, величина которого может значительно превосходить аналогичную величину на нормальной к струе плоскости.



Фиг. 1. Положение наклонной преграды в поле течения струи в цилиндрической системе координат

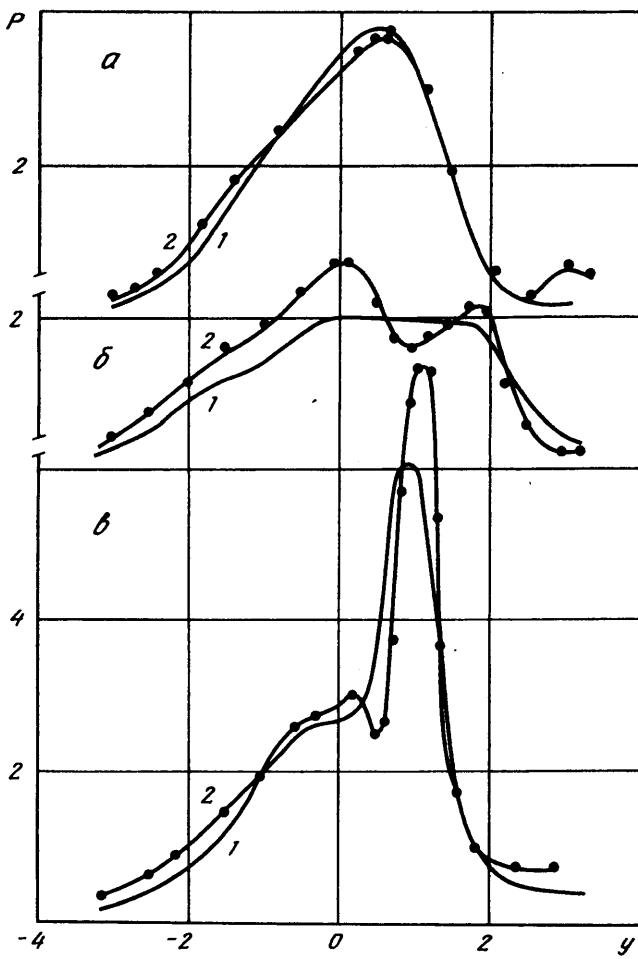


Фиг. 2. Изолинии чисел Маха в плоскости симметрии струи

Первые численные расчеты по натеканию равномерного сверхзвукового потока на наклонную преграду были проведены методом интегральных соотношений [11].

В настоящей работе численный эксперимент по исследованию течения у наклонной плоскости проведен методом крупных частиц [12]. Рассмотрено течение идеального газа. Для численной реализации течения привлечена нестационарная система уравнений Эйлера, записанная в цилиндрических координатах. В поле течения используется криволинейная эйлерова сетка, которая в каждом численном расчете адаптируется к поверхности преграды.

Сверхзвуковая осесимметричная недорасширенная струя вытекает из конического сопла с параметрами на срезе M_a , θ_a , γ , n ($n = P_a/P_n$ – нерасчетность струи) и взаимодействует с соосно расположенной наклонной преградой. Преграда моделируется плоскостью с расчетной областью радиуса R и установлена под углом α к оси симметрии струи (фиг. 1). Исследуемая область – область между срезом сопла и поверхностью преграды по оси x . Ось x совпадает с осью симметрии струи и на ней фиксируется положение преграды от среза сопла $X = x/r_a$. По оси y – область между осью симметрии струи и свободной границей в радиальном направлении и в силу осесимметричности течения в струе от 0 до π – в тангенциальном. Постановка граничных условий традиционна. Использовалось условие непротекания на оси симметрии струи, условие равенства нулю нормальной составляющей скорости на наклонной плоскости и условие свободного вытекания на свободных границах. Стационарное решение задачи получено в результате установления с помощью монотонных разностных схем сквозного счета первого порядка точности. В качестве параметров для численного эксперимента рассматривались число Маха на срезе сопла ($M_a = 2; 2.2$), степень нерасчетности струи ($n = 1.2; 2$), угол наклона плоскости к оси симметрии струи ($\alpha = 90, 80, 70, 60^\circ$) и расстояние между срезом сопла и преградой ($X = 2, 3, 4$).

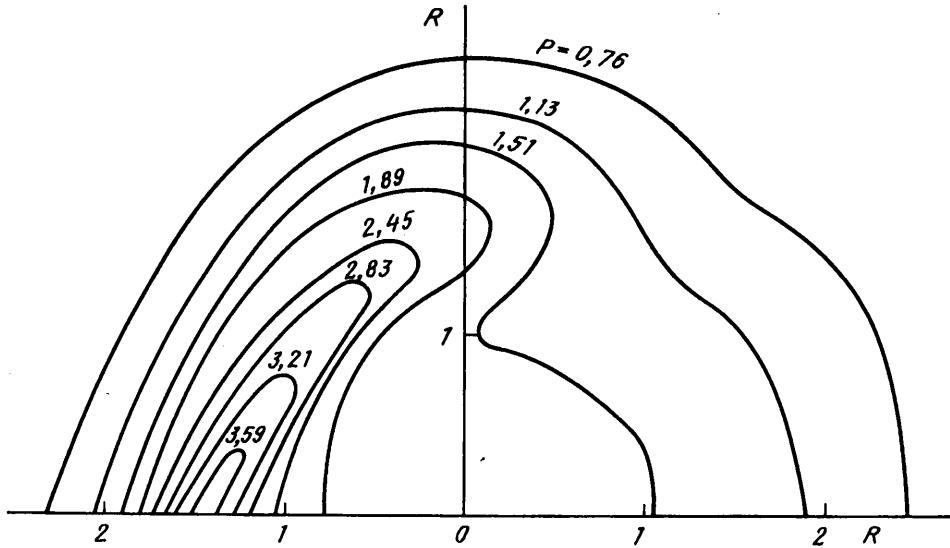


Фиг. 3. Характерные эпюры давлений в плоскости симметрии преграды: $\alpha - \alpha = 70^\circ$; $\beta - \alpha = 80^\circ$, $\gamma - \alpha = 60^\circ$

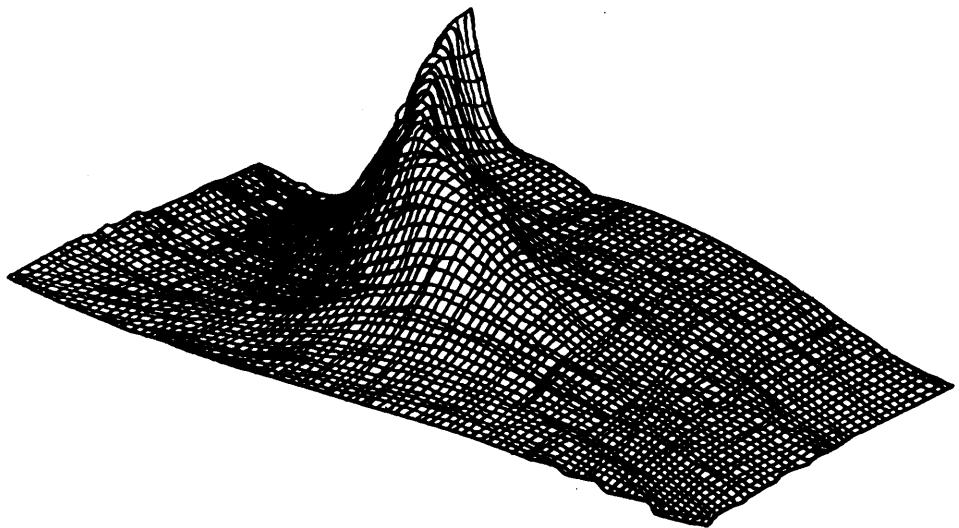
Параметры с размерностью длины обозначены на радиус среза сопла r_a , а с размерностью давления – на давление на срезе сопла P_a .

Типичное течение в струе в плоскости оси симметрии представлено на фиг. 2 для потока с параметрами на срезе сопла $M_a = 2$, $\theta_a = 10^\circ$, $\gamma = 1,4$, $n = 2$ изолиниями чисел Маха. Плоскость удалена от среза сопла на расстояние $X = 3$ и наклонена под углом $\alpha = 60^\circ$. Поле чисел Маха показывает существенную несимметрию в параметрах потока в плоскостях $\theta = 0$ и π . В плоскости $\theta = 0$ происходит поджатие потока и его торможение. В плоскости $\theta = \pi$ течение разгоняется и имеет максимальную скорость на преграде. Сгущение изолиний числа Маха фиксирует положение отошедшего скачка уплотнения в сжатом слое у поверхности.

В струе в плоскости симметрии преграды зафиксированы характерные эпюры давлений (фиг. 3). Струя с параметрами $M_a = 2,2$ и $n = 2$ взаимодействует с преградой, установленной под углом $\alpha = 70^\circ$ на расстоянии $X = 2$, имеет эпюру давления, характерную для нормально расположенной плоскости (фиг. 3, α). Однако точка положения максимального давления смешена от оси симметрии к периферии преграды в плоскости $\theta = 0$. Иная эпюра давления на преграде формируется струей с $n = 2$, $X = 4$ при угле $\alpha = 80^\circ$ (фиг. 3, β). С уменьшением угла наклона преграды от оси



Фиг. 4. Поле изобар для режима с периферийным максимумом давления



Фиг. 5. Распределение статического давления на преграде при угле наклона $\alpha = 70^\circ$

симметрии $\alpha = 60^\circ$, $n = 1,2$, $X = 4$ эпюра имеет локальный периферийный максимум, положение которого определяется областью тройной конфигурации скачков уплотнения в поле течения струи (фиг. 3, в). Кривые с точками на фиг. 3 соответствуют экспериментальным данным из работы [10].

Распределение давления на преграде наиболее наглядно фиксируется полем изобар (фиг. 4). Поле изобар представляет собой семейство вложенных кривых. Для режимов с локальным периферийным максимумом давления на преграде поле изобар сгущением кривых показывает размеры и расположение зоны максимального давления. Визуализация эпюры давления на плоскости для подобных режимов взаимодействия представлена на фиг. 5. Данная эпюра сформирована сверхзвуковой струей с $M_a = 2,2$, $n = 2$ при $X = 4$ и $\alpha = 70^\circ$.

Заключение. Параметрические расчеты были проведены с использованием адаптивной к геометрии течения сетки с областями сгущения в ней, что позволило получить удовлетворительное согласование численных и экспериментальных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семилетенко Б.Г., Усков В.Н. Экспериментальные зависимости, определяющие положение ударных волн в струе, натекающей на преграду, перпендикулярно ее оси // Инж.-физ. журн. 1972. Т. 23. № 3. С. 453–458.
2. Голубков А.Г., Козьменко Е.К., Остапенко В.А., Солотчин А.В. О взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской ограниченной преградой // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1972. С. 52–58.
3. Набережнова Г.В., Нестеров Ю.Н. Неустойчивое взаимодействие расширяющейся сверхзвуковой струи с преградой // Тр. ЦАГИ. 1976. Вып. 1765. 23 с.
4. Рудакова Г.М., Рудаков А.И. Численное моделирование нестационарного обтекания преграды сверхзвуковым струйным потоком // Сверхзвуковые газовые струи. Новосибирск: Наука, 1983. С. 22–31.
5. Дубинская Н.В., Иванов М.Я. Численное исследование стационарных режимов взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской преградой, расположенной перпендикулярно ее оси // Изв. АН СССР. МЖГ. 1976. № 5. С. 49–56.
6. Кузьмина В.Е. Некоторые аспекты численного исследования взаимодействия сверхзвуковой струи с плоской преградой // Вестн. ЛГУ. 1981. № 1. С. 72–77.
7. Благосклонов В.И., Давыдов Ю.М., Набережнова Г.В. Численное исследование осесимметричного взаимодействия сверхзвуковой струи с плоской преградой, расположенной перпендикулярно к оси струи // Тр. ЦАГИ. 1980. Вып. 2040. С. 25–37.
8. Давыдов Ю.М., Набережнова Г.В., Нестеров Ю.Н. Исследование устойчивых и неустойчивых режимов взаимодействия сверхзвуковых недорасширенных струй с преградами. М.: ВЦ АН СССР, 1981. 46 с.
9. Henderson L.F. Experiments on the impingement of a supersonic jet on a flat plate. ZAMP 1966. V. 17. № 5. P. 553–569.
10. Lamont P.J., Hunt B.L. The impingement of underexpanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates // J. Fluid Mech. 1980. V. 100. № 3. P. 471–511.
11. Базжин А.П. К расчету обтекания сверхзвуковым потоком газа плоской пластины с неприсоединенным скачком уплотнения // Инж. журн. 1963. Т. 3. Вып. 2. С. 222–227.
12. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982. 392 с.

Москва

Поступила в редакцию
4.XII.1995