4. Вычисление поправок к тепловой силе. Поле $\mathbf{v}^{(2)}$ входит в граничное условие для поля $\mathbf{v}^{(3)}$. Разложим $\mathbf{v}^{(2)}$ на поверхности частицы в ряд Тейлора по степеням R/l. Для вычисления поправок первого порядка по R/l следует использовать только первый член этого разложения $\mathbf{v}^{(2)}$ $(-l, 0, 0)$, поскольку $|\mathbf{v}^{(2)}|\sim R/l$. Использование в качестве граничного условия первого члена разложения эквивалентно наличию у частицы добавочной скорости $-\mathbf{v}^{(2)}$ $(-l, 0, 0)$ относительно окружающей среды

$$v_x^{(2)}(-l,0,0)=-3B/4l,\qquad v_y^{(2)}=v_z^{(2)}=0 \tag{4.1}$$

Таким образом, с точностью до членов первого порядка по R/l влиянием возмущения стенкой температурного поля можно пренебречь. Однако возмущение поля локальных течений, обусловленных неоднородным температурным полем, в окрестности частицы оказывается первого порядка по R/l. Влияние добавочной скорости приводит к увеличению как силы сопротивления, так и тепловой силы в одинаковое число раз. Выражения для тепловой силы и стоксовской силы сопротивления, полученные путем интегрирования тензора вязких напряжений, имеют вид

$$\mathbf{F}_T=\mathbf{F}_T{}^*\left(1+\frac{9}{8}\frac{R}{l}\zeta\right),\qquad \mathbf{F}=\mathbf{F}^*\left(1+\frac{9}{8}\frac{R}{l}\zeta\right) \tag{4,2}$$

$$\zeta=\frac{(1+2C_m\lambda/R)}{(1+3C_m\lambda/R)}$$

Здесь $\mathbf{F}_T{}^*$, $\mathbf{F}^*$ — тепловая и стоксовская силы в отсутствие стенки.

Приведенный анализ показывает, что стенка не оказывает влияния на скорость термофореза аэрозольных частиц, находящихся вдали от нее ($R/l\ll 1$), поскольку и тепловая и стоксовская силы изменяются в одинаковое число раз.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. И. Яламову за постановку задачи, обсуждение результатов и постоянное внимание к работе.

Поступила 8 V 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ивченко И. Н., Яламов Ю. И.* Гидродинамический метод расчета скорости термофореза умеренно крупных нелетучих аэрозольных частиц. Ж. физ. химии, 1971, т. 45, № 3.
2. *Ивченко И. Н., Яламов Ю. И.* О термофорезе аэрозольных частиц в почти свободномолекулярном режиме. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 3.
3. *Хаппель Дж., Бреннер Г.* Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М., «Мир», 1976.
4. *Loyalka S. K.* Momentum and temperature-slip coefficients with arbitrary accommodation at the surface. J. Chem. Phys., 1968, vol. 48, No. 12.
5. *Brenner H.* Effect of finite boundaries on the Stokes resistance of an arbitrary particle. J. Fluid Mech., 1962, vol. 12, pt. 1.

УДК 533.697.4

О ВОЗМОЖНОСТИ БЕЗОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ В СОПЛЕ С СИЛЬНО ИЗОГНУТЫМИ СТЕНКАМИ

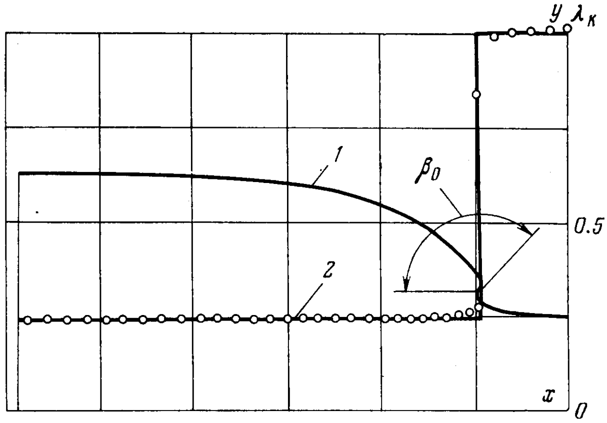
Н. А. ПОДСЫПАНИНА, Э. Г. ШИФРИН, М. А. ШУЛАКОВ

(Москва)

Приводится пример расчета течения в плоском сопле Лаваля, контур которого на дозвуковом участке имеет вогнутость по отношению к направлению набегающего потока. В рамках гипотезы о безотрывном течении идеального газа на стенках построенного сопла отсутствуют области замедления потока. Это позволяет предположить, на основании известных критериев, существование безотрывного пограничного слоя, что должно обеспечивать безотрывность течения в целом.

Метод [1] профилирования сопл состоит в решении задачи Дирихле для уравнения Чаплыгина в прямоугольнике, расположенном в дозвуковой части плоскости годографа и опирающемся на звуковую линию. Ни краевая задача, ни алгоритм численного решения не налагают ограничений на высоту прямоугольника β_0. Если выбрать $\beta_0 > \pi/2$, то после отображения решения в физическую плоскость получится сопло со впадиной на дозвуковом участке контура. При этом, по построению, вдоль стенки сопла скорость либо постоянна, либо монотонно возрастает. Идея такого сопла указывалась ранее в [1–3].

На фигуре (кривая *1*) приведен контур дозвукового участка сопла с прямой звуковой линией при $\beta_0=3\pi/4$, $\lambda_0=0.244$ (λ_0 — приведенная скорость на входе в сопло). Для полученного контура сопла была решена прямая задача численным методом [4]: по полученным из расчета координатам контура и условию выравнивания угла наклона вектора скорости на входе в сопло было определено поле течения в сопле, в том числе и на его стенках. На фигуре точками отмечено распределение



скорости вдоль стенки сопла λ_k, полученное из решения прямой задачи [4]; линия *2* соответствует распределению скорости, задаваемому при решении задачи профилирования. Если учесть, что решение задачи профилирования проводилось на сетке 70×70 точек, а решение прямой задачи — на сетке 70×25 точек, то среднее отличие этих распределений ~0.75%, характеризующее суммарную погрешность двух методов, можно признать вполне удовлетворительным.

Результаты проверки показали также, что сопло (см. фигуру) принадлежит области корректности решения прямой задачи сопла Лаваля, которая в какой-то мере адекватна физической задаче получения потока газа с заданными параметрами и степенью равномерности.

Отмеченное выше свойство отсутствия областей замедления газа на стенке сопла, по принятым в настоящее время представлениям, гарантирует существование безотрывного пограничного слоя, а значит, и безотрывность течения в целом (рассматриваемого теперь как решение уравнений Навье — Стокса при достаточно большом числе Рейнольдса). Эти представления основываются как на математической теории несжимаемого пограничного слоя [5], так и на полуэмпирических «локальных» критериях отрыва [6] (строго говоря, они несправедливы в окрестности точек бесконечной кривизны стенки, каковыми являются точки сопряжения прямолинейного и криволинейных участков).

Поступила 1 III 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. *Подсыпанина Н. А., Шифрин Э. Г.* Об одном методе профилирования коротких плоских сопл. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 1.
2. *Степанов Г. Ю., Гогиш Л. В.* Квазиодномерная газодинамика сопел ракетных двигателей. М., «Машиностроение», 1973.
3. *Гуревич М. И.* Теория струй идеальной жидкости. М., «Наука», 1979.
4. *Шифрин Э. Г., Шулаков М. А.* Решение прямой задачи сопла Лаваля численным методом Коула. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 4, (аннотация докл. на семинаре НИВЦ МГУ под руководством акад. Г. И. Петрова).
5. *Олейник О. А.* Математические задачи теории пограничного слоя. Усп. матем. н., 1968, т. 23, № 3.
6. *Чжен П.* Отрывные течения. т. 1, М., «Мир», 1972.