

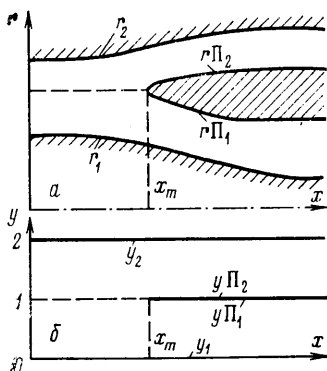
УДК 533.6.014

РАСЧЕТЫ ДОЗВУКОВЫХ НЕВЯЗКИХ ТЕЧЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛАХ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПОТОКОВ

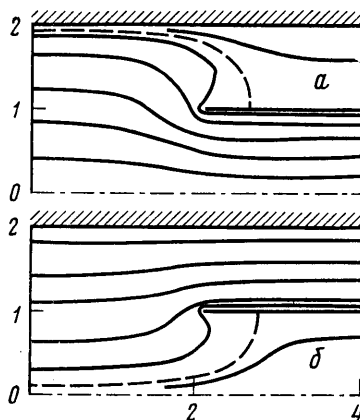
КОНОВАЛОВ А. Е.

Течение газа в канале с разделением потоков продольной перегородкой характеризуется отношением расходов m во внешнем (G_e) и внутреннем (G_i) трактах $m = G_e/G_i$. Так, например, течению в канале с пристеночным экраном, образующим со стенкой канала узкую кольцевую щель, соответствует значение $m \ll 1$. В случае установки в канале газоотборной трубки величина $m \ll 1$. В двухконтурных газотурбинных двигателях m имеет порядок единицы или нескольких единиц [1].

Особенностью течения в канале с перегородкой является наличие «жидкой» границы между потоками до начала перегородки. В зависимости от условий задачи при заданной форме канала и перегородки положение разделяющей поверхности тока



Фиг. 1



Фиг. 2

изменяется. В работе численно исследуется влияние отношения расходов m на картину течения в таком канале.

1. Рассмотрим дозвуковое невязкое безотрывное течение в осесимметричном криволинейном канале с перегородкой (фиг. 1, а). В случае стационарного потенциального потока задача сводится к интегрированию уравнения для функции тока

$$(1.1) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = 0$$

с граничными условиями

$$(1.2) \quad \begin{aligned} x=0, \quad \psi = \psi(r); \quad r=r_1(x), \quad \psi=0; \quad r=r_2(x), \quad \psi=G \\ r=r\Pi_1(x), \quad \psi=G_i; \quad r=r\Pi_2(x), \quad \psi=G_i; \quad x=l, \quad \partial\psi/\partial x=0 \end{aligned}$$

Последнее условие означает, что канал оканчивается достаточно длинным цилиндрическим участком.

Уравнение (1.1) содержит неизвестную функцию — плотность газа ρ , которая вычисляется с помощью конечного соотношения, представляющего собой интеграл Бернулли. Для более общего случая система уравнений в переменных ψ, ρ подробно описана в работе [2].

Данная краевая задача аппроксимируется конечно-разностной схемой переменных направлений второго порядка точности [3]. Решение находится с использованием итерационного процесса.

При построении расчетной сетки важно, чтобы ее узлы принадлежали границе области определения искомой функции. Поэтому предварительно область течения отображается на прямоугольник с разрезом (см. фиг. 1, б) так, чтобы граница r_1

перешла в y_1 , r_2 — в y_2 , а перегородка сжалась в отрезок

$$(1.3) \quad y = \frac{r-r_1}{r\Pi_1-r_1}, \quad r \leq r_m; \quad y = 1 + \frac{r-r\Pi_2}{r_2-r\Pi_2}, \quad r \geq r_m$$

Здесь r_m — радиус носка перегородки. При $y=1$ $\partial\psi/\partial y$ будет иметь разрыв. Соединив точку $(0, 1)$ с образом носка перегородки (x_m, y_m) , делим область течения на две части, решение в которых можно искать отдельно. При этом граничным условием на отрезке $(0, 1)$, (x_m, y_m) будет условие непрерывности функции и ее производной

$$(1.4) \quad \{\psi\}=0, \quad \{\partial\psi/\partial r\}=0$$

В новой системе координат сетка получается квадратной, ее узлы совпадают с границами области. Совпадение носка перегородки с узлом сетки легко получить выбором шага по оси x или продолжением канала влево.

В расчетах использовалась сетка 40×40 . Расчет одного варианта на ЭВМ БЭСМ-6 требует около двух минут машинного времени. Хотя переход к более крупной сетке 20×20 дает максимальное изменение скорости на стенке не более 1%, предпочтение было отдано мелкой сетке из-за удобства построения линий тока.

2. Рассмотрим для простоты течение в круглой трубе с перегородкой также в форме трубы вдвое меньшего диаметра. В качестве геометрической характеристики канала введем величину отношения площадей в сечении x_m (см. фиг. 1) $m_p = (r_2^2 - r_m^2) / (r_m^2 - r_1^2)$. В данном случае $r_1 = 0$. При отношении расходов $m = m_p$ линии тока будут прямыми. Для рассматриваемого примера $m_p = 3$. Расчеты проводились в диапазоне изменения m от 300 до 0,01. Характерные картины течения представлены на фиг. 2, где линии тока $\psi = \text{const}$ изображены сплошными кривыми, а разделяющие линии — штриховыми. При $m/m_p \neq 1$ течение таково, что перед разделяющей перегородкой одна часть потока тормозится, а другая ускоряется. Так, например, при $m > 3$ внутренний участок канала является диффузором с «жидкой» стенкой, а внешний — конфузуром. При $m < 3$ диффузор будет снаружи, а конфузор внутри. Естественно ожидать, что вязкий пограничный слой на стенке трубы, который в данной постановке задачи должен быть пренебрежимо тонким, может оторваться при достаточно сильном торможении потока. Этот вопрос в целях последовательности изложения будет рассмотрен ниже.

В случае $m/m_p > 2$ или $m/m_p < 1/2$ в канале появляются зоны обратных токов, а критическая точка на перегородке, в которую приходит разделяющая линия, смещается от носка перегородки вниз по потоку на расстояние Δ . Заметим, что, как и в случае циркуляционного обтекания пластины [4], разделяющая линия подходит к перегородке под прямым углом снаружи (при $m = 0,05$, см. фиг. 2, а) или изнутри (при $m = 300$, см. фиг. 2, б). Этот результат можно пояснить с помощью простых рассуждений. Пусть разделяющая линия тока подходит к стенке неперпендикулярно, с некоторым наклоном. Тогда две близкие к этой линии, но принадлежащие разным потокам линии тока в окрестности критической точки будут иметь существенно отличающуюся кривизну. В соответствии с кривизной градиенты давления будут различными и неравновесными. Поэтому на объем, заключенный между рассматриваемыми линиями тока, будет действовать сила, стремящаяся уменьшить наклон разделяющей линии тока. Таким образом, стационарное течение реализуется лишь в том случае, когда разделительная линия тока перпендикулярна поверхности перегородки в критической точке.

Зависимость величины $D = \Delta / (r_m(1 + m_p))$, характеризующей смещение критической точки от носка перегородки Δ , от параметра $\mu = \lg(m/m_p)$ показана на фиг. 3. В интервале значений m/m_p (0,5; 2) критическая точка практически совпадает с носком перегородки.

В случае каналов с другим соотношением размеров, например $m_p \gg 1$ или $m_p \ll 1$, целесообразно проводить расчеты в два этапа. Сначала рассчитывается течение в исходном канале. Так как используемая сетка является равномерной, то область течения вблизи носка перегородки будет содержать малое количество ячеек. Заменяв удаленную стенку канала соответственно выбранной достаточно «близкой» линией тока, снова повторим расчет уже для канала с характерным значением $m_p \approx 1$. Примеры таких расчетов для $m_p = 0,2$ и $m_p = 30$ показывают, что и для этих случаев величина смещения Δ по порядку величины хорошо согласуется с данными на фиг. 3, полученными для $m_p = 3$.

Вернемся к вопросу о влиянии вязкости и об условиях, когда ей можно пренебрегать. Если на стенке канала есть участок с положительным градиентом давления, то при фиксированных параметрах пограничного слоя на входе можно подобрать значение m , при котором пограничный слой оторвется. При этом фактическое распределение скорости вблизи стенки будет отличаться от расчетного.

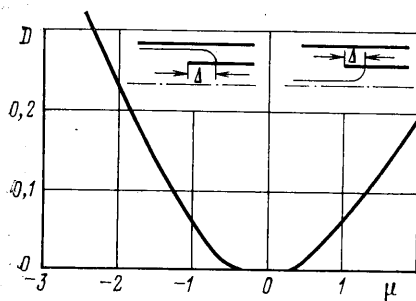
В зависимости от вида отрыва модель невязкого течения в той или иной степени лишь качественно описывает реальное течение в канале. Поэтому при решении прикладных задач надо проверять безотрывность течения.

В качестве примера рассмотрим течение в канале, близком по форме (см. фиг. 4) к переходному каналу двухконтурного газотурбинного двигателя [5]. Для вычисления характеристик пограничного слоя был использован метод, основанный на интегрировании уравнения энергии [6]. В соответствии с [7] в качестве условия безотрывности течения было принято соотношение $H < 3$. Здесь H — формпараметр пограничного слоя, представляющий собой отношение толщин вытеснения и потери импульса.

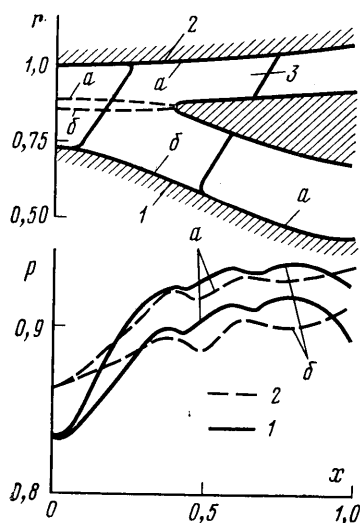
Процедура проверки безотрывности течения была включена в основную программу расчета в виде отдельного блока.

Рассматриваемый канал кроме двух стенок (1, 2) и перегородки имеет 8 радиальных стоек (3), имеющих симметричный аэродинамический профиль толщиной в 12% хорды. Загромождение сечения канала стойками учитывается введением зависящего от координат множителя в уравнение (1.1) [2]. В области, свободной от стоек, этот множитель равен единице.

Расчеты проводились для двух значений отношения расходов: $m=0,75$ (а) и $m=1$ (б). При следующих условиях на входе в канал: число Маха $M=0,466$, формпараметр $H=1,33$, число Рейнольдса $Re=$



Фиг. 3



Фиг. 4

$\approx 1,6 \cdot 10^6$, относительная толщина потери импульса $\delta^{**}/r_2(0)=0,003$. Некоторые результаты расчетов представлены на фиг. 4. Штриховыми линиями показаны разделяющие линии тока. В качестве масштабов на координатных осях графика взяты радиус внешней стенки и полное давление на входе в канал. Из распределения давления на стенках канала следует, что его входной участок является диффузорным. Некоторая немонотонность кривых обусловлена влиянием стоек и перегородки. Торможение потока вследствие диффузорности канала может привести к отрыву пограничного слоя на его стенках. Так, при $m=0,75$ отрыв возможен на верхней стенке (2) в средней части канала и на нижней стенке (1) в его конце. Начало отрывных зон на фиг. 4 отмечено стрелками. При $m=1$ происходит перераспределение потоков, в результате которого отрывная зона во внутреннем тракте канала смещается вверх по течению. Во внешнем тракте градиент давления уменьшается настолько, что течение становится безотрывным.

Как показывают расчеты, безотрывность течения при заданном отношении расходов m можно обеспечить путем подбора соответствующей формы стенок канала и перегородки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев Б. А. Двухконтурные турбореактивные двигатели. М.: Воениздат, 1973.
2. Хирш, Варзе. Метод конечных элементов для расчета течения в турбомашинах. Теорет. основы инж. расчетов, 1976, № 3.
3. Годунов С. К., Рябенский В. С. Разностные схемы. М.: Наука, 1973.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970.
5. Garret and Volvo Flugmotor. TFE1042 low bypass turbofan.— Aviation Week and Space Technology, 1979, v. 110, No. 23.

Москва

Поступила в редакцию
30.XI.1979