

УДК 532.525

© 1993 г. Н. Л. ЕФРЕМОВ

РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУЖАЮЩИХСЯ-РАСШИРЯЮЩИХСЯ СОПЕЛ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ УЧАСТКОМ МИНИМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Сужающиеся-расширяющиеся сопла с цилиндрическим участком минимального сечения могут использоваться как расходомерные устройства для различных совершенных газов. Для таких сопел в приближении идеального газа рассчитаны коэффициенты расхода μ , представляющие отношение расходов двумерного и одномерного изэнтропического потоков. Исследовано влияние угла наклона дозвуковой части образующей сопла ($\theta = 30 - 75^\circ$) и величины показателя адиабаты газа ($\gamma = 1,05 - 1,6$) на μ . Для сопла с $\theta = 45^\circ$ оценено влияние турбулентного пограничного слоя на коэффициент расхода при $\gamma = 1,05$, $Re = 10^6$ и начальной толщине вытеснения $\delta^* = 0,001$.

Расчет течения проводился численным интегрированием уравнений Эйлера по схеме Годунова — Колгана [1] с использованием адаптированных сеток со сгущением сеточных линий в точках излома контура [2]. Предполагалось, что отношение площадей входа и минимального сечения достаточно велико и не оказывает влияния на μ .

На фиг. 1 показаны контуры трех исследованных сопел. Радиус цилиндрического участка минимального сечения равен 1, его длина 0,5, радиус входа дозвуковой части 3, угол наклона сверхзвуковой части образующей 15° , а ее длина по оси 1. Перед сужающимися частями сопел имелась цилиндрическая труба длиной 3, которая плавно (по радиусу) сопрягалась с конической образующей. Расчеты проведены для сопел с углами наклона дозвуковой части образующей $\theta = 30, 45, 75^\circ$ и значений показателя адиабаты $\gamma = 1,05, 1,4, 1,6$.

Графики изменения μ в зависимости от γ для исследованных сопел показаны на фиг. 2. Кривая 1 соответствует $\theta = 30^\circ$, кривая 2 — 45° и кривая 3 — 75° . Как видно, величина μ меняется практически линейно по γ . Величина угла наклона этих отрезков прямых 1—3 зависит от угла θ . Такая зависимость μ от γ и θ позволяет получить простую аппроксимационную формулу для определения μ в виде

$$\mu = \mu(\theta, \gamma_0) + a(\gamma - \gamma_0), \quad \mu(\theta, \gamma_0) = 1 - 0,01131b + 0,0168b^2$$

$$a = -0,03311b + 0,01279b^2 - 0,002544b^3, \quad b = \theta/45^\circ, \quad \gamma_0 = 1,4$$

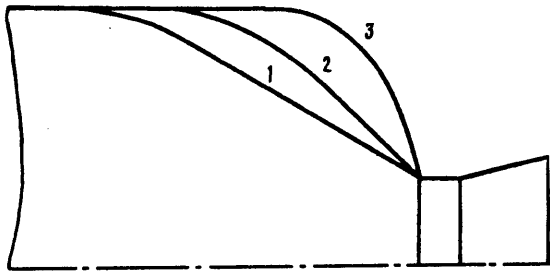
Рассчитанные по этой формуле значения μ в зависимости от угла θ для $\gamma = 1,05$ (кривая 1), 1,4 (2) и 1,7 (3) приведены на фиг. 3.

Величина μ для сопла с внезапным сужением ($\theta = 90^\circ$) для $\gamma = 1,4$, вычисленная по этой формуле, равна 0,841, а по данным [3] $\mu = 0,839$, т. е. отличие не превышает 0,3%.

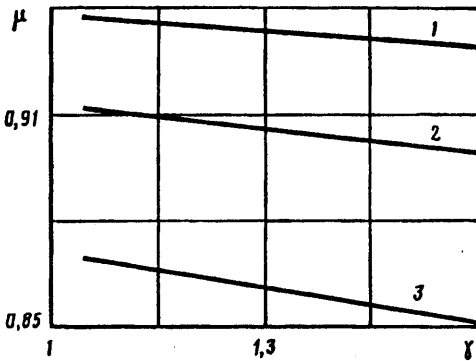
Как показано в [4], влияние вязкости на μ проявляется в изменении эффективного наклона образующей дозвуковой части, либо эффективной площади минимального сечения сопла. В зависимости от того, какой эффект преобладает, величина μ может как уменьшаться, так и увеличиваться по сравнению с течением идеального газа.

Для оценки влияния вязкости для сопла 2 ($\theta = 45^\circ$) проведен расчет течения с учетом толщины вытеснения турбулентного пограничного слоя. Пограничный слой рассчитывался при $\gamma = 1,05$, $Re = 10^6$ и начальной толщине вытеснения $\delta^* = 0,001$ с использованием интегрального метода [5].

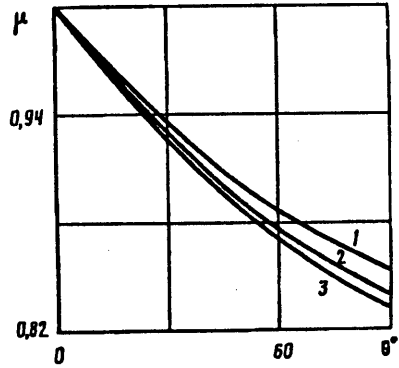
Максимальное значение величины $\delta^* = 0,0163$ получается в области начала сужения дозвуковой части, где наблюдается положительный градиент давления, а минимальное значение, равное 0,0004, — в начале цилиндрического участка горла сопла, т. е. площадь минимального сечения изменяется мало. Величина μ с учетом и без учета вязкости составила соответственно 0,914 и 0,912. Некоторое увеличение μ при учете вязкости, по-видимому, связано с уменьшением в этом случае эффективного



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

наклона дозвуковой части образующей сопла и, как следует из [4], с ростом угла θ приращение μ должно увеличиваться (до 0,6—0,7% при $\theta = 75 - 80^\circ$).

Автор выражает благодарность Р. К. Тагирову за внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тилляева Н. И. Обобщение модифицированной схемы С. К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки//Уч. зап. ЦАГИ. 1986. Т. 17. № 2. С. 18—26.
2. Щербаков С. А. Расчет по модифицированной схеме С. К. Годунова невязкого течения в соплах и струях//Тр. ЦИАМ. 1985. № 1155. С. 1—4.
3. Крайко А. Н., Тилляева Н. И., Щербаков С. А. Сравнение интегральных характеристик и формы профилированных контуров сопел Лавала с «плавным» и с «внезапным» сужениями//Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 4. С. 129—137.
4. Тагиров Р. К. Влияние пограничного слоя на расход и удельный импульс сужающегося сопла//Изв. вузов. Авиац. техника. 1988. № 1. С. 77—81.
5. Sasman P. K., Cresci R. J. Compressible turbulent boundary layer with pressure gradient and heat transfer//AIAA Journal. 1966. V. 4. № 1. P. 19—25.

Москва

Поступила в редакцию
30.III. 1992