

УДК 532.525

© 1992 г. Н. Л. ЕФРЕМОВ, Р. К. ТАГИРОВ

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
БЕЗОТРЫВНОГО СУЖАЮЩЕГОСЯ СОПЛА

Теоретический предел тяги сопла Лавала в рамках модели идеального газа обеспечивает сопло с нулевой длиной дозвуковой (сужающейся) части, т. е. сопло с внезапным сужением входного участка [1, 2]. Такая входная часть дает максимальную неравномерность параметров в минимальном сечении и, следовательно, максимальную удельную тягу при минимальной длине.

На практике, однако, трение на стенке и положительный градиент давления в окрестности входного сечения сопла могут привести к отрыву пограничного слоя и соответственно к дополнительным потерям тяги. Поэтому необходим метод профилирования сужающегося сопла минимальной длины, обеспечивающего безотрывность течения вязкого газа в сопле. Для решения этой задачи в [3] предложен приближенный метод профилирования контура сужающегося сопла. Безотрывность течения в таком сопле обеспечивается за счет выполнения в каждой точке на стенке необходимого условия $\xi = \delta^*/\rho_w u_w^2 dp/dl \leq \xi_{\max}$, где ξ_{\max} — критерий отрыва пограничного слоя. Положительные градиенты давления в области входа такого сопла должны быть максимально большими, обеспечивающими выполнение условия $\xi \leq \xi_{\max}$. Ожидалось, что спрофилированное указанным способом сужающееся сопло будет обеспечивать безотрывное течение при меньшей длине и большей тяге по сравнению с обычными соплами.

Построенные в [3] контуры сужающихся сопел оказались, как и ожидалось, короче традиционно используемых. Однако для подтверждения безотрывного характера течения и определения тяговых характеристик с целью их сравнения с характеристиками других сопел необходимы прямые численные исследования. Такие расчеты и соответствующий анализ, подтверждающие преимущества предложенного в [3] способе профилирования сужающихся сопел, выполнены в данной работе.

Контур сопла описывается в системе координат x, r , где x — ось симметрии, r — радиус. Для определения ординат контура $r(x)$ решается система двух уравнений

$$\frac{\partial r}{\partial x} = f, \quad \frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{(1+f^2)^{1,5}}{R(x)}$$

где $R(x) = \delta^*(x)/\varepsilon_{\max}$ — местный радиус кривизны стенки. Максимально допустимая величина критерия отрыва турбулентного пограничного слоя ξ_{\max} определяется с помощью аппроксимационной формулы [3]. Толщина вытеснения пограничного слоя $\delta^*(x)$ находится на основе приближенного решения интегрального уравнения пограничного слоя, полученного в [3] в виде алгебраического соотношения.

Для построения контура должны быть заданы следующие начальные данные: r_0 — радиус минимального сечения сопла (или расход m), γ — показатель адиабаты, δ_0^* — толщина вытеснения во входном сечении сопла, T_w — температура стенки (отнесена к полной температуре T_0), n — показатель степени профиля скорости пограничного слоя, Re_0 — число Рейнольдса, определяемое по критическим параметрам потока и входному радиусу r_0 .

Отметим, что все газодинамические параметры отнесены к соответствующим критическим параметрам (u — к a_* , ρ — к ρ_* , r — к $\rho_* a_*^2$), линейные размеры — к r_0 .

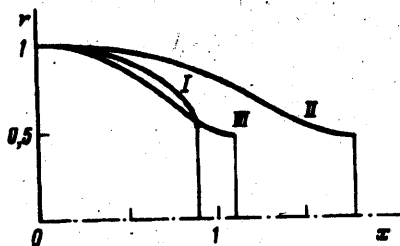
Для примера проведен расчет при следующих значениях параметров: $r_0 = 0,502$, $\gamma = 1,2$, $\delta_0^* = 0,0209$, $T_w = 0,28$, $n = 7$, $Re_0 = 10^7$.

Величина $\delta_0^* = 0,0209$ во входном сечении сопла получена на основе расчетов пограничного слоя в предположении, что перед соплом имеется цилиндрический канал длиной $x = -0,9$ и что на входе в этот канал толщина вытеснения $\delta_N^* = 0,014$.

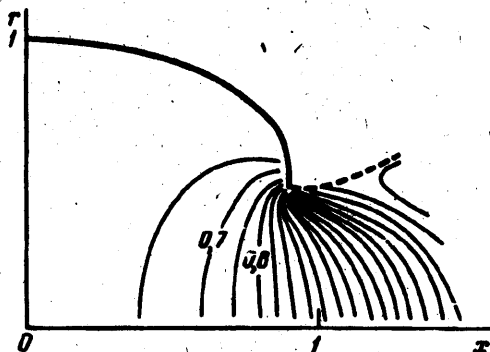
Полученный контур I показан на фиг. 1. Найденное сопло имеет длину $x = 0,85$ и вертикальный участок стенки в плоскости выходного сечения.

Для расчета течения невязкого газа в построенном осесимметричном сужающемся сопле, а также на участке истекающей струи длиной 0,5 применялась конечно-разностная схема Годунова — Колгана. При этом для более точного описания течения использовались адаптированная сетка и соответствующая программа [4]. Расчеты проведены для нескольких значений степени понижения давления $\pi_c = p_0/p_H$, где p_0 — полное давление, постоянное по высоте входного сечения сопла, p_H — давление окружающей среды.

Полученные изомахи для $\pi_c = 8$ показаны на фиг. 2, распределения давления p вдоль



Фиг. 1



Фиг. 2

стенки в зависимости от l/r_0 — на Фиг. 3, где l — расстояние вдоль стенки, отсчитываемое от входного сечения сопла.

В результате расчетов определены интегральные величины: коэффициенты импульса $J^+ = J/J_0$, расхода $\mu = m/m_0$, удельного импульса i и удельной тяги R_y

$$i = \frac{J^+}{\mu}, \quad R_y = a_1 \left(i - \frac{1}{\alpha_2 \mu \pi_c} \right) (1 - \pi_c^{(1-\gamma)/\gamma})^{-1/2},$$

$$a_1 = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)^{1/2}, \quad a_2 = 2 \left(\frac{2}{1 + \gamma} \right)^{1/(\gamma-1)}$$

Здесь J_0 и m_0 — импульс и расход одномерного потока, отнесенные соответственно к $\rho_0 a_0^2 r_0^2$ и $\rho_0 a_0 r_0^3$ ($J_0 = 1 + \gamma^{-1}$, $m_0 = 1$). Интегральные величины для сопла I приведены в табл. 1, из которой видно, что, хотя значения коэффициента расхода μ малы, удельные параметры i и R_y имеют высокие значения.

Таблица 1

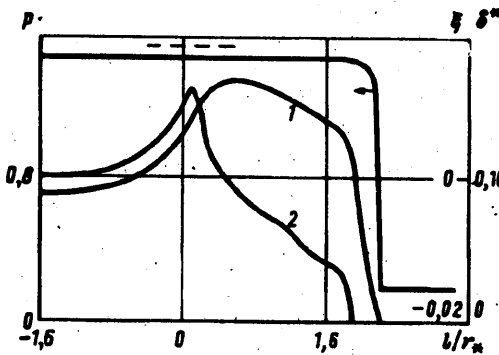
π_c	J^+	μ	i	R_y
4,6	0,886	0,854	1,0379	0,972
6	0,887	0,858	1,0337	0,954
8	0,887	0,860	1,0316	0,934

С использованием интегрального метода [5] проведен расчет турбулентного пограничного слоя вдоль стенки сопла при $\gamma = 1,2$, $\delta_H^+ = 0,014$, $n_H = 7$, $T_w = 0,28$, $Re_0 = 10^5$.

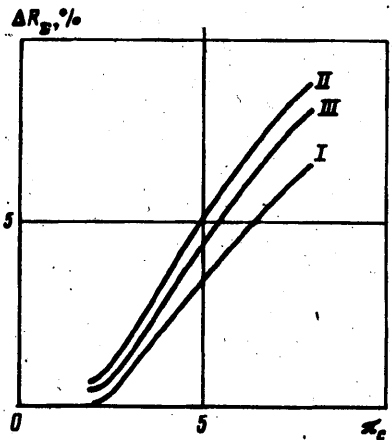
Полученные распределения толщины вытеснения δ^+ (кривая 1) и параметра ξ (кривая 2) показаны на Фиг. 3. Для $T_w = 0,28$ величина критерия отрыва $\xi_{\max} = 0,019$ показана штриховой линией. Видно, что на всей длине построенного сопла выполняется необходимое условие безотрывности течения $\xi < \xi_{\max}$. Толщина вытеснения в конце сужающегося сопла $\delta^+ = 0,00051$.

Следует отметить значительное уменьшение толщины вытеснения пограничного слоя в окрестности минимального сечения сопла: $\delta^+/\delta_0^+ \approx 0,024$. Это означает, что в области минимального сечения пограничный слой обладает повышенной устойчивостью к отрыву, поскольку из соотношения $\delta^+/\rho_0 u_c dp/dl \leq \xi_{\max}$ следует, что он может преодолеть без отрыва значительный положительный градиент давления (увеличение давления примерно в 40 раз). Поэтому высказанные в [2] опасения о возможном отрыве пограничного слоя в области минимального сечения оптимального сопла Лавала из-за наличия угловой точки и положительного градиента давления за ней, по-видимому, не столь критичны, во всяком случае для турбулентного режима течения при больших числах Рейнольдса.

Тяговые характеристики построенного безотрывного сопла I интересно сравнить с характеристиками какого-либо сопла из семейства обычных сужающихся сопел. Для сравнения выбран один из применяемых на практике контуров, образованный с помощью двух дуг окружностей с радиусами $R_0 = 2,5$ и $R_c = 0,737$. При этом максимальный угол наклона стенки $\theta_{\max} = 33^\circ$, длина $x = 1,775$, $r_c = 0,462$. Контур этого сопла II показан на Фиг. 1. С использованием указанных выше методов для него проведены расчеты параметров невязкого потока и турбулентного пограничного слоя. В исследованном диапазоне изменения $\pi_c = 4,6 - 8$ для этого сопла получены следующие значения параметров: $J^+ = 0,997$, $\mu = 0,995$, $i = 1,0018$.



Фиг. 3



Фиг. 4

Удельная тяга R , при этом изменяется от 0,963 (при $\pi_c = 4,6$) до 0,92 ($\pi_c = 8$). Видно, что по сравнению с соплом I удельные параметры i и R , ниже.

В результате расчетов пограничного слоя определено значение $\delta_0^* = 0,0012$. Установлено, что контур сопла II также безотрывный ($\xi < \xi_{\max}$), однако его длина в ~ 2 раза больше длины сопла I.

Контур сопла II удовлетворяет рекомендациям [6], обычно используемым при профилировании сужающихся сопел. В соответствии с этими рекомендациями контур сопла должен строиться с учетом следующих ограничений: $R_0 \geq r_0$, $\theta \leq 40^\circ$, $R_s \geq 0,5r_s$. Можно для сравнения построить контур минимальной длины, описанный дугами двух окружностей и удовлетворяющий указанным ограничениям. Этот контур III (Фиг. 1), также входящий в семейство обычных сужающихся сопел, имеет следующие характеристики: $x = 1,092$, $R_0 = 1$, $R_s = 0,24$, $\theta_{\max} = 40^\circ$, $r_s = 0,462$. В диапазоне изменения $\pi_c = 4,6 - 8$ получены следующие значения интегральных параметров: $J^* = 0,988$, $\mu = 0,98$, $i = 1,008$. Удельная тяга при этом $R_s = 0,967 - 0,924$.

Результаты расчетов показали, что в сопле III возникает отрыв, поскольку в окрестности сечения $x = 0$, $\xi > \xi_{\max}$. Для всех трех сопел определены удельные коэффициенты потерь тяги на трение ΔR_f , значения которых приведены ниже. Видно, что у сопла I — минимальные потери тяги на трение. Величина ΔR_f для всех сопел слабо зависит от π_c , как и следовало ожидать (табл. 2).

Таблица 2

π_c	$\Delta R_f(I)$	$\Delta R_f(II)$	$\Delta R_f(III)$
4,6	0,00019	0,00525	0,00314
6	0,00017	0,00471	0,00281
8	0,00015	0,00442	0,00264

Суммарные коэффициенты потерь удельной тяги $\Delta R_\Sigma = (1 - R_s + \Delta R_f) \cdot 100\%$ для всех трех сравниваемых сужающихся сопел приведены на фиг. 4. Видно, что на всех режимах сопло I имеет меньшие потери тяги, чем сопла II и III. Следует отметить, что суммарные потери удельной тяги сопла III в действительности несколько выше указанных из-за наличия отрыва потока, влияние которого в расчетах не учитывалось.

Таким образом, проведенные исследования безотрывного сужающегося сопла I, спроектированного для заданных значений r_s , γ , δ_0^* , T_w , Re_0 , n , показали, что оно дает при меньшей длине большую тягу по сравнению с сужающимися соплами II и III обычных схем. Рассмотренные сужающиеся сопла могут входить в состав соответствующих сужающихся-расширяющихся сопел Лавала. Если эти сопла сравнивать при одинаковой полной длине, то сопло Лавала, содержащее сужающееся сопло I, может иметь большую тягу по сравнению с двумя другими соплами. Это обеспечивается [2] увеличенным импульсом сужающейся части и увеличенной длиной расширяющейся части сопла.

Следует отметить, что контур I может служить базой для построения любого количества сужающихся безотрывных сопел. Для этого достаточно провести из любой точки контура касательную прямую или кривую с положительной кривизной. При этом базовый контур по

сравнению со всем этим семейством контуров будет иметь наименьшую длину. Возможно, однако, что сам базовый контур может быть еще укорочен, так как из фиг. 3 видно, что $\xi < \xi_{\max}$ во всех точках. Но, по-видимому, этот резерв мал, поскольку, например, переход от начальной кривизны контура I к начальной кривизне контура III приводит к появлению отрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайко А. Н. Вариационные задачи газовой динамики, постановки, методы решения, соотношение точных и приближенных подходов//Проблемы современной механики. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 90—100.
2. Крайко А. Н., Тилляева Н. И., Щербаков С. А. Сравнение интегральных характеристик и формы профилированных контуров сопел Лаваля с «плавным» и с «внезапным» сужениями//Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 4. С. 129—137.
3. Тагиров Р. К. Определение удельной тяги на незапертых режимах и построение безотрывного контура сужающегося сопла//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 1. С. 158—164.
4. Щербаков С. А. Расчет по модифицированной схеме С. К. Годунова невязкого течения в соплах и струях//Тр. ЦИАМ. 1985. № 1155. С. 1—4.
5. Sasman P. K., Gresci R. J. Compressible turbulent boundary layer with pressure gradient and heat transfer//AIAA Journal. 1966. V. 4. № 1. P. 19—25.
6. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Течения газа в соплах. М.: Изд-во МГУ, 1978. 351 с.

Москва

Поступила в редакцию
10.I.1991