

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНЫХ СОПЛ ЛАВАЛЯ

А. Б. БОБОВИЧ, В. Б. КОРНИЛОВИЧ, Б. Н. МАСЛОВ,
А. А. ПИШКОВ

(Москва)

Расчетно-теоретические исследования возмущенных течений в соплах проведены в работах [1-3]. В работах У. Г. Пирумова (с 1957 г., например [1]) разработан метод расчета в линеаризованной постановке возмущений радиального течения от пространственного и плоского источников, позволяющий определить параметры течения в конических соплах при условии, что на некоторой начальной линии заданы малые возмущения потока. Решение находится в виде рядов с использованием присоединенных функций Лежандра и функций Хейна. В работах [2, 3] также в линеаризованной постановке исследовано распространение малых асимметричных возмущений в сверхзвуковой части сопла с осевой [2, 3] или плоской [3] симметрией. Решение получается в виде рядов с использованием функций Бесселя и тригонометрических функций. Показано [1-3], что распространение возмущений в сверхзвуковой части сопла имеет колебательный характер, причем амплитуда убывает с ростом числа Маха. Для исследования распространения возмущений в сверхзвуковой части сопла в нелинеаризованной постановке используются трехмерный метод характеристик [4] и метод сквозного счета [5]. Задача о смешанном течении в соплах с несимметричной дозвуковой частью в рамках нелинейных уравнений впервые решена численно в работе [6], что позволило в дальнейшем проводить обширный математический эксперимент, некоторые результаты которого опубликованы в [7].

Известно, что при повороте всей сверхзвуковой части сопла относительно дозвуковой части на угол β_2 поток поворачивается приблизительно на тот же угол, а поперечная сила Y имеет порядок $X \sin \beta_2$, где X — величина реактивной силы. Небольшое отличие Y от $X \sin \beta_2$ в зависимости от длины сопла имеет знакопеременный колебательный характер, обусловленный распространением вниз по потоку возмущений, возникающих в точке излома образующей. Если при повороте сверхзвуковой части сопла образующая в точке излома входит в поток, расчеты методом малых возмущений показывают, что поперечная сила превышает эту величину вследствие повышения давления за скачком уплотнения [8].

При повороте оси концевой участка длиной L_4 порядка 0.1 общей длины сверхзвуковой части сопла на угол β поток поворачивается на меньший угол $\sim \beta L_4^0 / r_1^0 M_a$ (формула подъемной силы внутренней поверхности кольцевого крыла) [8]. Если плоскость выходного среза повернута на угол β_3 , относительную поперечную силу $Y^0 = Y/X$ можно оценить с помощью [10] или по формуле [8]

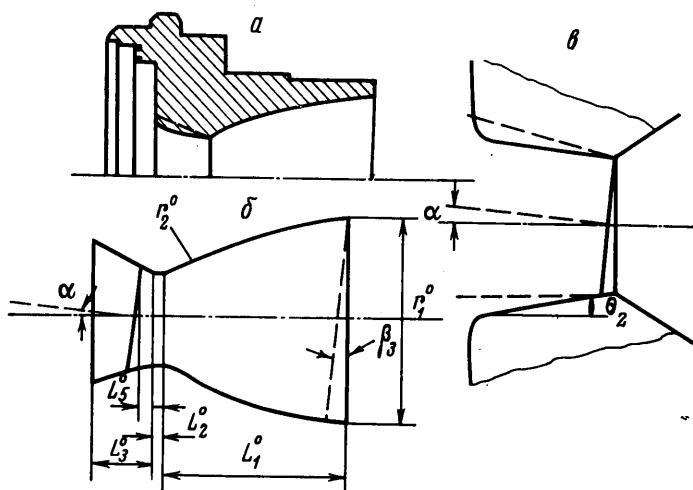
$$(0.1) \quad Y^0 \approx \frac{\operatorname{tg} \beta_3}{(1 + k M_a^2) (1 - \operatorname{tg}^2 \theta_1 \operatorname{tg}^2 \beta_3)^{1/2}}$$

В данной работе проводилось экспериментальное определение величины поперечной силы, являющейся следствием несимметрии поля давления в асимметричных соплах. Проведены три основных серии испытаний асимметричных сопел: сопла с числом $M_a = 1$ («сопло-очко») и различными дозвуковыми частями, характер и величина асимметричных искажений профилей которых изменялись в широких пределах; различные сверхзвуковые сопла с асимметричными дозвуковыми частями, отличающимися лишь углом поворота своих осей β_1 , и расстоянием от точки излома до минимального сечения L_5^0 ; сопла с асимметричными сверхзвуковыми и осесимметричными дозвуковыми частями.

1. Методика испытаний и сопла. Испытания проводились на воздушной дифференциальной установке А. А. Сергиенко, с двух сторон ресивера которой устанавли-

ваются соосно сравниваемые сопла. Установка позволяет с высокой точностью измерять разность осевых сил двух сравниваемых сопел при равенстве расхода через них. Так как при исследовании сопел с малой асимметрией контура необходимо замерять небольшие поперечные силы ($0.5 \div 1.5\%$ осевой силы), были приняты специальные меры, позволяющие повысить точность получаемых результатов по Y . Каждое сопло изготовлялось с жесткими допусками в трех экземплярах. Фактические размеры каждого экземпляра сопла, получаемые в результате тщательного обмера, использовались в дальнейшем при анализе и обработке результатов испытаний.

Была принята методика четырех- и восьмикратных испытаний каждого сопла, позволяющая исключить основную часть систематической ошибки установки и ошибки, связанной с погрешностями изготовления сопел и мест крепления. При восьмикратных испытаниях сопло последовательно поворачивалось вокруг своей оси и испыты-



Фиг. 1

валось на одной из сторон ресивера в таких положениях, чтобы предполагаемое направление поперечной силы составляло с горизонтальной плоскостью $0, 90, 180$ и 270° ; таким же образом сопло испытывалось и на другой стороне ресивера.

При четырехкратных испытаниях сопло устанавливалось в положениях 0 и 180° . Испытания с поворотом сопла на 180° позволяют исключить систематическую ошибку установки при замере поперечных сил. Дополнительный поворот сопла на 90 и 270° позволяет определить поперечную силу как геометрическую сумму двух составляющих $\Pi = \sqrt{Y^2 + Z^2}$ и тем самым исключить технологическую ошибку из-за непараллельности плоскости симметрии и горизонтальной плоскости, связанную с неточностью изготовления. Как оказалось, во всех испытаниях величина Z составляла менее $0.03 Y$. Значительное число сопел (более трети) испытывалось повторно. Таким образом, каждая приведенная на графиках экспериментальная точка после приведения и осреднения соответствует большому числу испытаний (минимум трех четырехкратных испытаний).

Испытания проводились в основном при давлении перед соплом $p_0 = 30 \div 32 \text{ кг/см}^2$, обеспечивающем безотрывное течение в сверхзвуковой части сопла. Часть испытаний проводилась при давлении $p_0 = 8 \div 30 \text{ кг/см}^2$ с целью определения влияния перерасширения потока на величину поперечной силы.

На фиг. 1, а представлено базовое сопло с асимметричной дозвуковой частью. Сопла имели диаметр минимального сечения $d_* = 35.85 \text{ мм}$ и сравнивались с осесимметричным эталонным соплом, имеющим следующие характерные параметры: диаметр минимального сечения $d_* = 35.85 \text{ мм}$, относительный радиус выходного сечения, геометрическую степень расширения сопла $r_1^0 = 2.04$, относительную длину сверхзвуковой части $L_1^0 = L_1/r_* = 4.07$, число Маха одномерного течения $M_a = 2.98$, относительную длину входного участка $L_3^0 = L_3/r_* = 1.22$, полуугол раствора входного участка $\theta_2 = 13^\circ$, относительную ширину цилиндрического пояса в области минимального сечения $L_2^0 = L_2/r_* = 0.11$. В качестве эталонного сопла в случае малых осевых сил

(сопло-очко или сопло, работающее с отрывом потока от стенки) использовалось осесимметричное сопло-очко с $d_* = 35.85$ мм. Сопла с асимметричной дозвуковой частью исследовались в двух вариантах: сопло-очко и сопло с осесимметричной сверхзвуковой частью.

Сверхзвуковые контуры сопел выбирались из семейства профилей максимальной тяги с геометрической степенью расширения $r_1^\circ = 2.04$. При этом контуры различались радиусом скругления в области минимального сечения $r_2^\circ = r_2/r_*$ и длиной сверхзвуковой части L_1° (фиг. 1, б). Для исследования закономерностей изменения величины поперечной силы в сверхзвуковой части сопла были изготовлены и испытаны сопла с разными длинами сверхзвуковой части $L_1^\circ = 2.82, 3.63, 4.07, 4.78, 6.95$ при нулевом радиусе скругления (с угловой точкой), сопла с одинаковой длиной $L_1^\circ = 4.07$ и разными радиусами скругления $r_2^\circ = 0.7, 1.2, 2.3, 3.0, 6.1, 7.8$ и конические сопла с полууглами раствора сверхзвуковой части $\theta_1 = 3^\circ 30', 6^\circ 17'$ ($r_2^\circ = 0$).

Асимметричная дозвуковая часть сопла (фиг. 1, в) изготавливалась следующим образом: первоначально растачивался симметричный конус с полууглом раствора θ_2 и длиной $L_3^\circ = L_3/r_*$, ось которого совпадала с осью сверхзвуковой части сопла.

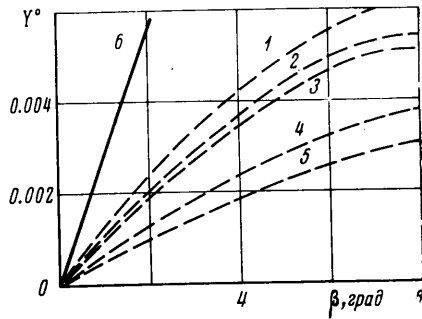
В области минимального сечения растачивался цилиндрический пояс шириной L_2° . Затем растачивался конус с полууглом раствора θ_2 , повернутый на угол α вокруг точки на оси сопла, отстоящей от минимального сечения на расстоянии $L_5^\circ = L_5/L_3 r_*$, либо сдвинутый параллельно оси на расстояние $\Delta^\circ = \Delta/r_*$; при этом в поперечных сечениях контур соответственно состоял

либо из дуги окружности и дуги эллипса, либо из двух дуг окружностей. Равноотстоящая в смысле наименьших квадратов от всех центров тяжести поперечных сечений входной части прямая, которая в дальнейшем принималась за ось асимметричной дозвуковой части сопла, при $L_5^\circ = 0$ повернута относительно оси сверхзвуковой части на угол $\beta_1 \approx \alpha/2$ либо отстоит от оси на $\delta = \Delta^\circ/2$.

При параметрическом исследовании поперечной силы варьировался каждый геометрический размер; при этом остальные параметры соответствовали эталонному осесимметричному соплу. Так, угол β_1 принимал значения: $2^\circ 31', 3^\circ 48', 5^\circ 32', 7^\circ 59'$ при $L_5^\circ = 0, 3^\circ 15', 4^\circ 37', 5^\circ 56'$ при $L_5^\circ = 0.32, 1^\circ 20', 1^\circ 55', 4^\circ 02'$ при $L_5^\circ = 0.45$; расстояние сдвига $\Delta^\circ = 0.056$ и 0.112 . При $\beta_1 = 5^\circ 32'$ исследовалось влияние параметров L_2°, θ_2 и L_3° , которые принимали следующие значения: $L_2^\circ = 0 \div 0.396, \theta_2 = 13, 18^\circ, L_3^\circ = 0.78, 1.22, 2.15$. Для получения зависимости поперечной силы по длине сопла при одной и той же асимметрии дозвуковой части ($\beta_1 = 5^\circ 32'$) последовательно укорачивались следующие сверхзвуковые растрески: а) $L_1^\circ = 2.82, 4.07, 6.96$ при $r_2^\circ = 0$ и б) конические сопла.

Асимметрия сверхзвуковой части сопла ($r_1^\circ = 2.04, L_1^\circ = 4.07, r_2^\circ = 0$) создавалась поворотом относительно точки на оси, отстоящей от минимального сечения на $0.15 L_1^\circ$ на угол $\beta_2 = 30^\circ, 45^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ при осесимметричной дозвуковой части ($\theta_2 = 13^\circ, L_3^\circ = 1.22$).

С целью определения влияния перерасширения потока на величину поперечной силы сопло с асимметричным входом $\beta_1 = 5^\circ 32'$ и сопло с несимметричным выходным срезом (угол между перпендикуляром к плоскости среза и осью сопла $\beta_3 = 7^\circ$) испытывались при разных давлениях в предсопловом объеме ($r_1^\circ = 2.04, L_1^\circ = 4.07, r_2^\circ = 0$).



Фиг. 2

2. Результаты. Величина поперечной силы, возникающей при течении газа в сопле с повернутой дозвуковой частью, с увеличением ширины цилиндрического пояска L_2° уменьшается практически линейно в исследуемом диапазоне и аппроксимируется зависимостью

$$Y(L_2^\circ)/Y(0) = 1 - 2.26L_2^\circ$$

Из-за наличия цилиндрического пояска в соплах со сверхзвуковой частью поперечная сила меньше поперечной силы сопла-очка, величина которой совпадает с расчетом [6, 7]. На фиг. 2 представлены зависимости

поперечной силы Y° от угла поворота дозвуковой части для сопел с разными длинами сверхзвуковой части ($L_1^\circ=2.82^{-4}$, 3.63^{-2} , 4.07^{-1} , 4.78^{-3} , 6.95^{-5} при $r_1^\circ=2.04$, $L_2^\circ=0.11$, $r_2^\circ=0$, $L_3^\circ=0$). Для сопла-очка с $L_1^\circ=0$, $r_1^\circ=1$, $L_2^\circ=0$, $L_3^\circ=0$ линией 6 представлена величина $-Y^\circ$.

При течении газа в соплах с $r_1^\circ=1$ и 2.04 поперечные силы направлены в противоположные стороны, а зависимость поперечной силы от угла поворота дозвуковой части имеет линейный характер при малых углах $\beta_1=0\div 4^\circ$. Для сопла-очка ($r_1^\circ=1$) коэффициент пропорциональности K_2 относительной поперечной силы $Y^\circ=Y/X$ (X — величина реактивной силы для сопла с $r_1^\circ=2.04$) углу поворота β_1

$$K_2=Y^\circ/\beta_1=0.12$$

Чем дальше от минимального сечения сопла в дозвуковой области находится рассматриваемый участок (симметричный или асимметричный), тем меньшее влияние он оказывает на параметры течения в трансзвуковой и сверхзвуковой областях. Ниже приведены значения K_2 для различных L_3° и L_1° .

L_3°	0		0.32		0.45	
L_1°	2.82	4.07	2.82	4.07	2.82	4.07
K_2	0.034	0.059	0.018	0.027	0.008	0.014

Значение K_2 резко уменьшается при возрастании расстояния от минимального сечения до зоны асимметрии. Изменение $K_2(L_3^\circ)/K_2(0)$ можно рассматривать как параметр, характеризующий влияние сечений в формировании потока в сопле.

Основные результаты исследований по влиянию длины и угла конусности дозвуковой части сопла на величину поперечной силы представлены ниже.

L_3°	0.78	1.22	2.15	1.22
θ_2	13°	13°	13°	18°
$Y_{L, \theta}^\circ$	0.8	1	1.01	0.95

Здесь $Y_{L, \theta}^\circ$ — отношение поперечной силы при разных L_3° и θ_2 к поперечной силе при $L_3^\circ=1.22$ и $\theta_2=13^\circ$.

Зависимость поперечной силы от величины поперечного сдвига имеет линейный характер с коэффициентом пропорциональности $K_4=Y^\circ/\Delta^\circ=0.123$.

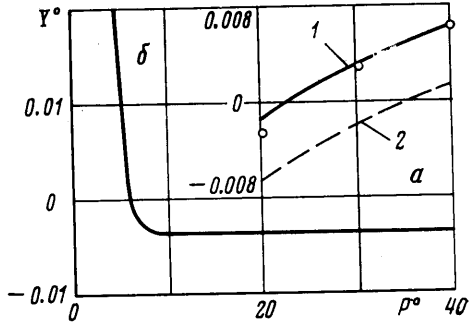
Если на входе в сопло-эталон поток повернут на угол γ , то поперечная сила практически равна нулю (коэффициент пропорциональности поперечной силы углу γ $K_3=0.027$).

При повороте оси сверхзвуковой части сопла на малый угол β_2 струя газа поворачивается практически на тот же угол, а поперечная сила Y° приближенно равна $\sin \beta_2$ [8]. Полученные в результате испытаний таких сопел значения Y° хорошо согласуются с приведенной формулой. При уменьшении отношения $P^\circ=p_0/p_n$ давления в предсопловом объеме сопла с несимметричным выходным срезом к внешнему давлению поперечная сила уменьшается, обращается в нуль и меняет знак. Результаты эксперимента (фиг. 3, а) совпадают с результатами расчета таких сопел (кривая 1) послойным методом характеристиками [11] и превышают результаты, полученные интегрированием одномерного распределения давления на неуравновешенной части сопла (кривая 2). Поэтому формулу (0.1) можно применять только для оценки величины поперечной силы.

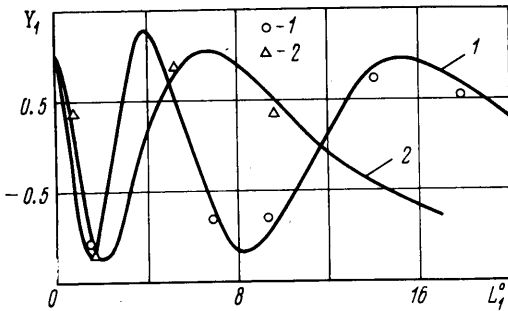
В случае одной и той же асимметрии дозвуковой части и разных длин сверхзвуковой части (при $r_1^\circ = \text{const}$) Y° имеет максимум в $L_1^\circ = 4.07$. Увеличение радиуса скругления r_2° при одних и тех же длине $L_1^\circ = 4.07$ и степени расширения $r_1^\circ = 2.04$ уменьшает величину Y° практически до нуля (при $r_2^\circ = 7.8$, $Y^\circ = 0$).

Характер изменения поперечной силы в зависимости от длины и радиуса скругления r_2° согласуется с результатами расчетов на ЭВМ по методике [2] и обусловлен закономерностями распространения возмущений в сверхзвуковой части сопла.

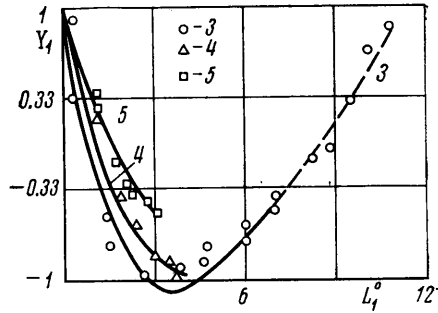
Экспериментальные зависимости поперечной силы, отнесенной к поперечной силе в точке экстремума Y_1 , от текущей длины сверхзвуковой части (фиг. 4, 5) совпадают с соответствующими расчетными зависимостями, полученными с помощью метода работы [2]. На фиг. 4 кривая 1 соответствует $\theta_1 = 3^\circ 30'$, кривая 2 — $6^\circ 17'$, на фиг. 5 кривые соответствуют соплам с $r_2^\circ = 0$: кривая 3 —



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

$L_1^\circ = 6.95$ (на штриховом участке сопло удлинено по конусу), кривая 4 — $L_1^\circ = 4.07$, кривая 5 — $L_1^\circ = 2.82$. Амплитуда колебаний поперечной силы уменьшается при увеличении длины сопла (см. также [2]). Частота колебаний (см. также [1]) увеличивается при уменьшении угла конусности (конические сопла) или среднего угла наклона сверхзвукового контура к оси (профилированные сопла).

Наличие асимметричных возмущений при перерасширенном течении в сверхзвуковой части сопла приводит к несимметричному отрыву потока от стенки и возникновению дополнительной поперечной силы. На фиг. 3, б представлена зависимость поперечной силы в сопле с $\beta_1 = 5^\circ 32'$, $L_1^\circ = 4.07$, $r_1^\circ = 2.04$, $r_2^\circ = 0$ от отношения давления в предсопловом объеме к атмосферному давлению. Дополнительная поперечная сила возникает при степени нерасчетности $p/p_n \approx 0.22$, которая меньше величины перепада давления при отрыве потока от стенки для $M_a \approx 2.98$ ($p/p_n \approx (1 + 0.5M_a)^{-1} \approx 0.4$).

Таким образом, при отклонении оси дозвуковой части от сверхзвуковой на угол β_1 поперечная сила имеет колебательный характер с амплитудой, пропорциональной углу отклонения в диапазоне $\beta_1 = 0 \div 4^\circ$. Зави-

симось поперечной силы при одних и тех же степени расширения и радиусе скругления от длины сверхзвуковой части в исследуемом диапазоне имеет максимум. При постоянных степени расширения и длине сопла поперечная сила падает с ростом радиуса скругления. Из-за асимметричных возмущений, формирующихся на входе в сверхзвуковую часть сопла, в перерасширенных течениях имеет место несимметричный отрыв потока от стенки и возникает дополнительная поперечная сила. В результате обобщения расчетно-теоретических выводов и выполненных экспериментальных исследований сопел с асимметричным контуром для оценок поперечной силы в зависимости от угла можно использовать формулу (0.1) и следующую оценочную формулу:

$$Y^\circ = A\beta, \quad \beta \leq 5^\circ$$

где $A=0.1$ при повороте дозвуковой части сопла на угол β , $A=1$ при повороте сверхзвуковой части сопла на угол β , $A=L_i^\circ/r_i^\circ M_a$ при повороте концевой участка длиной L_i° на угол β .

Поступила 29 I 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздова Н. В., Пирумов У. Г., Росляков Г. С., Сухорукое В. П. Сверхзвуковые течения газа в конических соплах. Некоторые применения метода сеток в газовой динамике, вып. VI, Тр. НИВЦ МГУ, 1974.
2. Darwell H. M., Trubridge G. F. P. Design of Rocket nozzles to reduce gas misalignment. J. Spacecraft and Rockets, 1968, vol. 5, No. 1.
(Рус. перев.: Профилирование сопел ракетных двигателей с точки зрения уменьшения несимметричности истечения. Вопр. ракетн. техн., 1968, № 8.)
3. Walters A. G. Non-symmetric flow in Laval type nozzles. Philos. Trans. Roy. Soc., London, 1972, vol. A273, No. 1232.
(Рус. перев.: Несимметричные течения в соплах Лавала. Вопр. ракетн. техн., 1974, № 8.)
4. Hoffman J. D., Maykut A. R. Gas dynamic gain of supersonic thrust nozzles. J. Spacecraft and Rockets, 1974, vol. 11, No. 10.
5. Иванов М. Я., Крайко А. Н. Метод сквозного счета для двумерных и пространственных сверхзвуковых течений. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1972, т. 12, № 3.
6. Дворецкий В. М., Иванов М. Я. К расчету смешанного течения в соплах с несимметричной дозвуковой частью. Уч. зап. ЦАГИ, 1974, т. 5, № 5.
7. Дворецкий В. М. К исследованию пространственных смешанных течений в соплах с несимметричным входом. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 2.
8. Шишков А. А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. М., «Машиностроение», 1974.
9. Strahle W. C. A theory of the aerodynamics of the supersonic splitline gimbaled nozzle. J. Spacecraft and Rockets, 1967, vol. 4, No. 2. (Рус. перев.: Аэродинамические характеристики сверхзвукового поворотного сопла с разрывом образующей. Ракетная техника и космонавтика, 1967, т. 5, № 5.)
10. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. М., «Машиностроение», 1968.
11. Аверенкова Г. И., Ашратов Э. А., Волконская Г. Г., Дьяконов Ю. Н., Егорова Н. И., Мельников Д. А., Росляков Г. С., Усков В. И. Сверхзвуковые струи идеального газа. М., Изд. МГУ, 1970.