

УДК 533.697.4

© 2004 г. М. Г. МОЙСЕЕВ, Е. А. НИКУЛИЧЕВА, В. С. СУМИНОВА

СОПЛО ЛАВАЛЯ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ПЕРЕРАСШИРЕНИЯ

Приводятся количественные результаты, представляющие величину тяговой и расходной характеристик осесимметричных сопел на режимах глубокого перерасширения. Получены оценки величины боковой составляющей реактивной силы и возможного диапазона ее существования для осесимметричных сопел, различающихся геометрией расширяющейся части. Предлагаются эмпирические формулы для расхода газа на докритическом режиме истечения и диапазона давлений, в котором этот режим проявляется.

Ключевые слова: режим глубокого перерасширения, боковая составляющая реактивной силы, продольная составляющая реактивной силы, диапазон существования бокового усилия, расход, докритический режим.

Приводимые ниже результаты заполняют определенный пробел в сведениях об истечении газа из сопла Лавалья в диапазоне давлений $\Pi = p_h/p_0 > 0.25-0.35$, где p_h – давление окружающей среды, p_0 – давление торможения на входе в сопло. На таких режимах наблюдается нарушение осесимметричного течения в расширяющейся части сопла и даже становится возможным изменение величины расхода газа через сопло вследствие воздействия окружающей среды. В отдельных публикациях по этому вопросу лишь отмечается факт возникновения такого явления и описываются некоторые частные результаты [1–5].

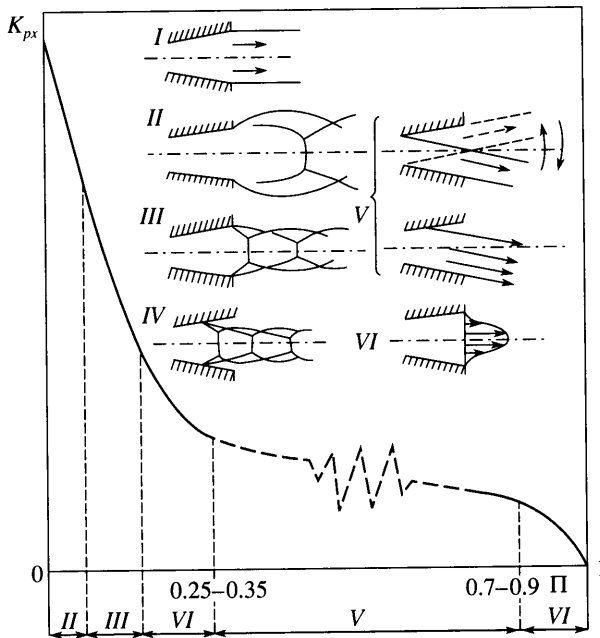
В зависимости от отношения давлений Π можно выделить несколько характерных режимов работы сопла. На фиг. 1 эти режимы рассматриваются на примере зависимости коэффициента тяги сопла K_{px} от отношения Π во всем возможном диапазоне.

Расчетный режим I, режимы II с недорасширением и III с перерасширением практически не имеют газодинамических особенностей. Величина реактивной силы, развиваемой соплом, на этих режимах зависит линейно от наружного давления. Внешние условия лишь незначительно нарушают течение газа в окрестности кромки сопла.

Режим IV – режим стационарного осесимметричного течения с отрывом сверхзвукового потока внутри сопла – наступает при некотором значении Π . Это значение зависит, главным образом, от расчетного числа Маха M_d на срезе сопла. По мере увеличения Π сечение отрыва перемещается в глубь сопла. В области между сечением отрыва и выходным сечением сопла вблизи стенки образуется осесимметричная зона обратного течения.

Режим V можно условно назвать режимом околозвукового течения в окрестности горла сопла, либо режимом возможного возникновения несимметричного истечения. Он различается либо неустановившимся характером течения с пульсациями истекающего потока, либо несимметричностью истечения. Такой режим течения может возникнуть в широком диапазоне отношения давлений $\Pi \approx 0.3-0.8$ и проявляется различным образом для сопел различной геометрии.

Режим VI – режим дозвукового истечения. Диапазон его существования может быть как весьма широким ($\Pi \approx 0.5-1$), так и очень узким $\Pi \approx 0.9-1$. Самое характерное для этого режима – возникновение скорости течения в горле сопла, меньшей критического значения и, как следствие этого, появление зависимости расхода газа через сопло от отношения Π .



Фиг. 1. Режимы работы сопла

Указанное выше деление режимов истечения достаточно условно. Так, между режимами V и VI не удастся провести четкую границу, поскольку несимметричное истечение может возникнуть и на дозвуковых режимах.

Основные цели данной работы – рассмотрение режима несимметричного истечения газа из осесимметричных сопел, выяснение диапазона существования этого режима, определение боковой составляющей реактивной силы и ее зависимости от геометрических характеристик сопла. Приводятся также экспериментальные оценки влияния перепада давлений Π (режим VI) на величину расхода газа, протекающего через сопла Лавала с различными геометрическими параметрами.

1. Особенности проведения экспериментов. Для изучения режимов несимметричного истечения используется экспериментальная установка, которая позволяет производить измерение реактивной силы, величина и направление которой заранее неизвестны. В опытах измеряются продольная составляющая реактивной силы, совпадающая по направлению с осью симметрии сопла, и боковая составляющая, лежащая в перпендикулярной оси плоскости. Значение последней и представляет основной интерес. Нерасчетный режим истечения обеспечивается соответствующей величиной давления воздуха на входе в испытуемое сопло. Истечение из сопла происходит в неподвижную окружающую среду.

Опыты проводились на модельных конических и профилированных соплах с диаметром критического сечения 20 мм. Докритическая часть конических сопел выполнена одинаковой и представляет собой конус с полным углом сужения 60° , что позволяет оценивать влияние на течение расширяющейся части сопла. В критическом сечении имеется цилиндрический участок длиной 2 мм. Докритическая часть всех профилированных сопел также одинакова и рассчитана по формуле Витошинского.

Сверхзвуковая часть конических сопел различается углом раствора и значением числа Маха на срезе сопла. Полный угол раствора сопла изменяется в диапазоне $2\alpha = 10\text{--}35^\circ$, число Маха на выходе $M_0 = 1.8\text{--}4$. Сверхзвуковая часть профилированных сопел рас-

считана методом характеристик и имеет тот же диапазон расчетного числа Маха на выходе $M_a = 1.8-4$. В опытах использовались сопла с параллельным выходом потока, укороченные, сопла с угловой точкой в критическом сечении и с плавным изменением профиля. Для измерения расхода газа через сопло использовалась расходомерная диафрагма.

Опыты показали, что для ряда сопел несимметричное истечение поддерживается в широком диапазоне изменения противодавления. Эксперименты проводились, как правило, при медленном подъеме давления торможения перед соплом p_0 до момента окончания несимметричного истечения и последующем медленном сбросе давления p_0 с тем, чтобы зафиксировать возникновение боковой силы на любой стадии опыта. Отдельные опыты проводились при $\Pi = \text{const}$. Производилась одновременная запись всех измеряемых величин: давления торможения перед соплом p_0 , боковой составляющей реактивной силы P_y (с помощью трех датчиков) и продольной составляющей реактивной силы P .

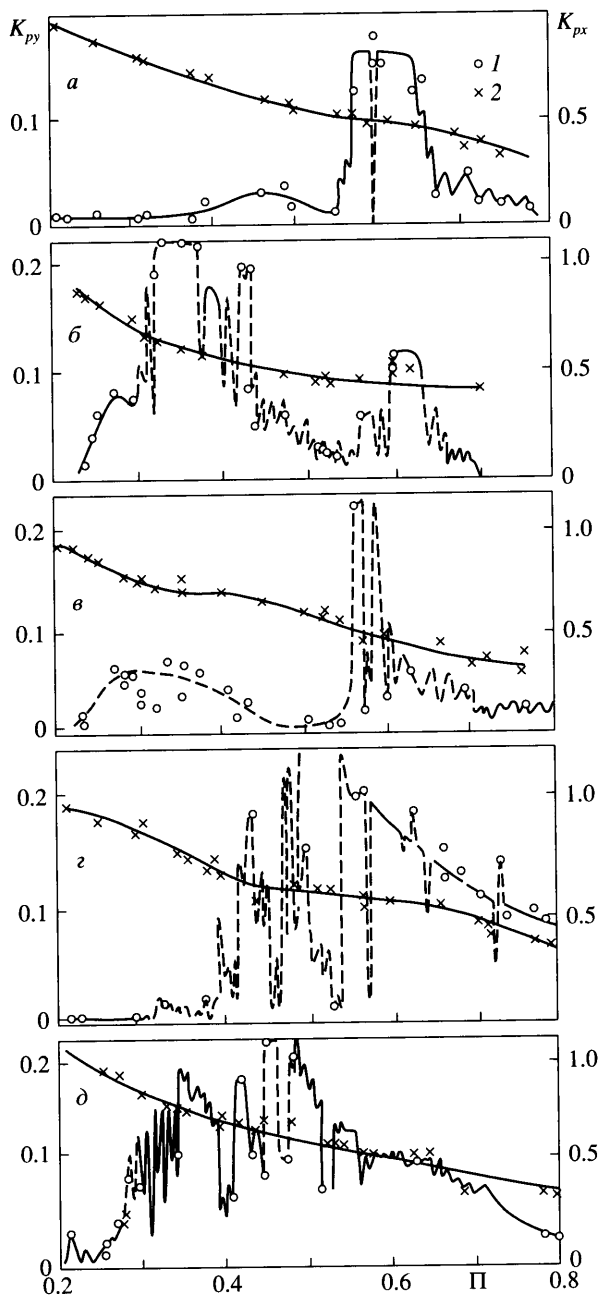
2. Экспериментальные характеристики несимметричного истечения. Для наглядного представления о несимметричном истечении газа из сопла Лаваля на фиг. 2 дается зависимость боковой составляющей реактивной силы P_y от отношения Π , построенная по результатам ее измерений с помощью системы датчиков. Здесь же приведен график продольной составляющей реактивной силы P . Для получения надежных результатов в ряде случаев опыты повторялись многократно. Полного совпадения результатов измерения величины P_y не получилось, что объясняется случайным характером процесса. Максимальные величины P_y и диапазон Π , при котором возникает боковая реактивная сила, хорошо воспроизводятся во всех опытах. Поэтому на фиг. 2 даются графики, представляющие собой некоторое обобщение экспериментальных данных. Приводимые данные отражают результаты испытания для сопел, заметно различающихся своими геометрическими размерами.

Несимметричное истечение в условиях глубокого перерасширения проявляется по-разному для сопел различных геометрических форм. Рассмотрим некоторые количественные результаты, иллюстрирующие влияние определяющих факторов Π , α и M_a на величину боковой составляющей реактивной силы $K_{py} = P_y / (p_0 F_*)$, где F_* – площадь критического сечения сопла. Для конических сопел влияние угла раствора и расчетного значения числа Маха на характер течения в сопле нельзя рассматривать изолированно друг от друга.

При малых углах раствора сопла боковая составляющая реактивной силы P_y практически отсутствует. Причиной этого, надо полагать, является большая длина закритической части таких сопел, где вследствие турбулентного перемешивания происходит выравнивание параметров потока в поперечном сечении.

Увеличение угла раствора сопла способствует появлению несимметрии течения, которая проявляется в большей степени для коротких сопел. Так, в соплах с углом раствора $2\alpha = 15^\circ$ при $M_a = 1.8-2.6$ возникает заметная боковая сила $K_{py} \approx 0.05-0.09$. Для сопла, рассчитанного на $M_a = 3$, она уже незначительна, а для еще более длинного сопла ($M_a = 3.4$) боковая сила практически отсутствует, хотя на осциллограмме наблюдается небольшое по амплитуде “биение”. Диапазон существования наибольших значений боковой составляющей лежит в пределах $\Pi = 0.3-0.5$.

Увеличение угла раствора сопла до $2\alpha = 20^\circ$ приводит к росту значения боковой составляющей реактивной силы. Так, например, для сопла с $M_a = 2.2$ (фиг. 2, а), $K_{py} = 0.12-0.19$. По мере роста расчетного значения числа Маха величина K_{py} убывает до 0.05 при $M_a = 3$. Сила P_y здесь имеет место, в основном, в области высоких противодавлений $\Pi = 0.55-0.7$. Дальнейшее увеличение угла раствора сопла до 25° приводит к появлению существенных значений боковой составляющей реактивной силы в широком диапазоне противодавлений $\Pi = 0.25-0.7$ для сопел, рассчитанных на $M_a = 2.6, 3$ (фиг. 2, б) и 3.4.



Фиг. 2. Боковая 1 и продольная 2 составляющие реактивной силы для конического сопла: а – $M_a = 2.2$, $2\alpha = 20^\circ$; б – 3, 25° ; в – 3, 35° ; з – 3.4, 35° ; для профилированного – $M_a = 2.9$, $2\alpha = 16^\circ$ (д)

Наибольшие значения боковой силы реализуются в соплах средней длины ($M_a = 3, 3.4$), достигая значений $K_{py} \approx 0.16-0.22$ в области надкритических режимов истечения $\Pi = 0.25-0.45$. Наряду с этим для сопла, рассчитанного на $M_a = 3$ (фиг. 2, б), наблюдается повышение величины K_{py} до значения $K_{py} = 0.08-0.1$ в диапазоне давлений $\Pi = 0.55-0.7$.

В случае длинной закритической части ($M_a = 4$) боковая составляющая P_y практически отсутствует.

В соплах с углами раствора $2\alpha = 30^\circ$ при $M_a = 2.6, 3$ и 3.4 возникают существенные значения боковой силы, достигающие значения $K_{py} \approx 0.2$. Уменьшение длины сопла ($M_a = 2.2$) приводит к падению величины K_{py} до значений $0.09-0.1$.

В соплах с большими углами раствора ($2\alpha = 35^\circ$) при отклонении потока к стенке сопла возникает еще бо́льшая боковая сила. Очевидно, что возможность отклонения струи в канале с большими углами раствора уменьшается в силу ослабления влияния стенок сопла. Видимо, именно по этой причине для сопла, рассчитанного на $M_a = 3$ (фиг. 2, в), наблюдается весьма большой ($K_{py} = 0.19-0.24$), но существующий лишь в узком диапазоне $\Pi = 0.52-0.55$ “пик” бокового усилия.

Однако при увеличении длины сопла ($M_a = 3.4$, фиг. 2, г) более развитая зона смешения с окружающей средой, возможно, способствует сохранению такого отклонения. Для такого сопла возникает широкий диапазон существования ($\Pi = 0.35-0.8$) боковой составляющей, которая здесь достигает значения $K_{py} = 0.18-0.22$. Дальнейшее увеличение длины сопла ($M_a = 4$) приводит к сглаживанию параметров потока в поперечном сечении. Наблюдаются лишь отдельные “всплески” боковой силы.

Таким образом, можно отметить, что с увеличением угла раствора сопла величина P_y возрастает, достигая значений $K_{py} = 0.2-0.24$ при углах раствора $2\alpha = 25-35^\circ$. Влияние числа M_a на величину боковой составляющей P_y связано с изменением длины расширяющейся части. Наибольшие значения боковой силы реализуются для сопел умеренной длины, соответствующей значениям $M_a = 2.6-3.4$. Увеличение длины сопла способствует большему перемешиванию потока в нем и сглаживанию возможной несимметрии истечения. Уменьшение же длины сопла сокращает протяженность зоны разрежения в сопле, поддерживающей возникающую несимметрию истечения.

Испытания профилированных сопел показали, что геометрия профиля сопла существенно сказывается на несимметричности истечения. Здесь, как и в случае конических сопел, отмечается сильное влияние угла раствора сопла на выходе и его степени расширения на величину боковой составляющей реактивной силы.

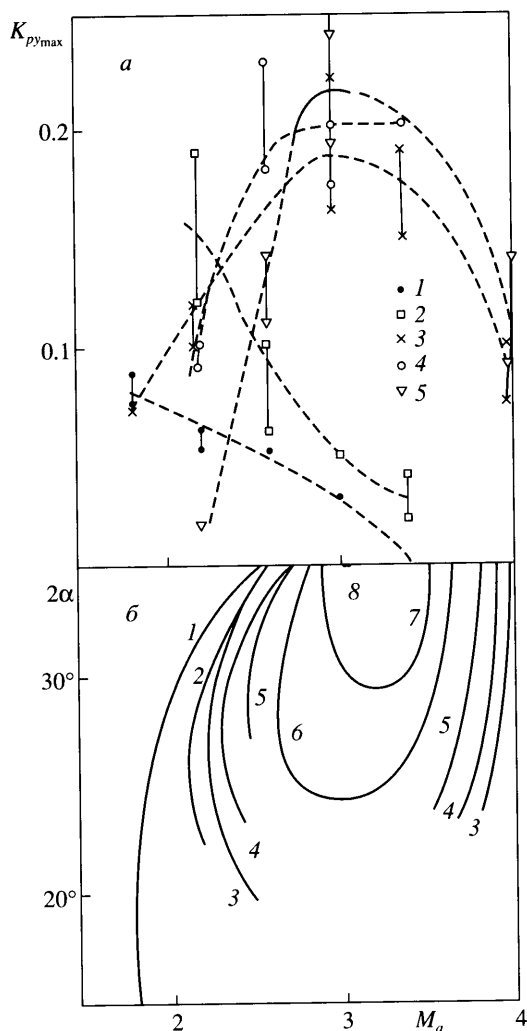
В профилированных соплах с параллельным выходом потока боковая составляющая реактивной силы имеет малое значение $K_{py} \approx 0.04-0.06$. Несимметричность течения здесь сглаживается интенсивным перемешиванием потока в закритической части сопла, представляющей собой канал значительной длины. Укорочение профилированных сопел и, следовательно, увеличение угла раствора сопла в выходном сечении и соответственно уменьшение числа Маха M_a приводят к увеличению боковой составляющей реактивной силы.

В качестве типичного примера на фиг. 2, д приводится график изменения K_{py} для сопла с $2\alpha = 16^\circ$, $M_a \approx 2.9$. Профиль сверхзвуковой части сопла построен методом характеристик без угловой точки. Видно, что диапазон существования несимметричного истечения для этого сопла весьма широк ($\Pi \approx 0.25-0.8$) и в пределах него наблюдаются участки плавного изменения P_y . Боковая составляющая $K_{py} = 0.2$ на режиме истечения $\Pi \approx 0.45$.

В целом влияние геометрии профилированных сопел на величину боковой составляющей силы P_y такое же, как у конических сопел.

3. О максимальных значениях бокового усилия. На фиг. 3, а даны максимальные значения K_{py} для различных конических сопел при различных значениях 2α . Эти максимальные значения для ряда сопел определены как средние арифметические по результатам нескольких измерений. На графике обозначен разброс измеренных величин.

По максимальным значениям силы, конечно, нельзя в полной мере судить о работе сопла, поскольку помимо этого важно принимать во внимание ширину диапазона противодавлений, в котором возникает боковая сила P_y и стабильность характера этой силы. На основании выполненных измерений можно сказать, что возможность



Фиг. 3. Максимальные значения боковой составляющей реактивной силы: *a* – $2\alpha = 15^\circ$ (1), 20° (2), 25° (3), 30° (4), 35° (5); *б* – $K_{py} = 0.08$ (1), 0.10 (2), 0.12 (3), 0.14 (4), 0.16 (5), 0.18 (6), 0.20 (7), 0.22 (8)

появления боковых усилий в большей степени присуща соплам, имеющим следующие параметры расширяющейся части: $2\alpha = 25\text{--}35^\circ$ и $M_a = 3\text{--}3.4$, которые характеризуются не только высокими значениями боковой силы, но и широким диапазоном ее существования, а также стабильным характером этой силы.

Из графика на фиг. 3, *a* видно, что наибольшие значения боковой составляющей достигаются в соплах с большими углами раствора ($2\alpha = 25\text{--}35^\circ$) при умеренных значениях расчетного числа Маха ($M_a = 2.6\text{--}3.4$). При уменьшении угла раствора сопла максимальные значения P_y смещаются в сторону меньших значений числа Маха M_a .

Результаты определения максимальных значений боковой составляющей реактивной силы K_{py} , приведенные на фиг. 3, *a*, представлены в переменных 2α , M_a на фиг. 3, *б*, где построены линии постоянных максимальных значений K_{py} . Из фиг. 3, *б* видно, что максимальные значения K_{py} имеют место в области $2\alpha \approx 25\text{--}35^\circ$ и $M_a \approx 3$.

Отметим также некоторую перестройку кривых изменения максимальных значений K_{py} в интервале $2\alpha = 20-25^\circ$ (см. фиг. 3, а). По-видимому, эта перестройка связана с величиной угла расширения оторвавшейся внутри сопла турбулентной струи.

Поясняя качественную картину возникновения боковой составляющей P_y , отметим влияние двух факторов. Первый фактор – геометрический, к которому следует отнести сочетание угла раствора раструба сопла и его длины, второй – обусловлен влиянием вязкости газа в расширяющейся части сопла. При некотором случайном отклонении потока от осевого направления создается несимметричное распределение давления в зоне обратных токов, охватывающей основной поток, что увеличивает это отклонение и как бы “прижимает” струю к стенке. Естественно, что величина возможного максимального отклонения потока ограничена присутствием стенки сопла. Поэтому наибольшие значения боковой составляющей P_y в проведенных опытах достигаются при больших значениях угла раствора сопла.

Однако наряду с этим при большой длине расширяющейся части даже для больших значений угла раствора сопла вследствие расширения турбулентного потока и возрастания его эжектирующего эффекта происходит замыкание потока на стенку по всему поперечному сечению сопла и, как следствие этого, подавление несимметрии истечения. Для коротких сопел явление несимметрии соответственно также не наблюдается. Поэтому максимальные значения боковой составляющей появляются при некоторой средней длине сопла.

4. Сравнение боковой и продольной составляющих реактивной силы. В изменениях продольной и боковой составляющих реактивной силы наблюдается определенное соответствие. Хотя изменение боковой составляющей реактивной силы P_y обычно сопровождается лишь незначительным изменением продольной составляющей силы, измерения показали, что пульсациям P_y соответствуют пульсации продольной силы. При этом появление (или возрастание) боковой составляющей может вызвать как некоторое уменьшение продольной составляющей, так и ее увеличение, что, по-видимому, вызывается перестройкой потока внутри сопла.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на режимах несимметричного истечения газа боковая составляющая реактивной силы может достигать существенной доли от продольной составляющей. Для конических сопел с $2\alpha = 25-35^\circ$ при $M_a = 26-3.4$ эта доля достигает 25–35%. Для укороченных профилированных сопел с $2\alpha \approx 15^\circ$ и $M_a \approx 3$ эта доля имеет такое же значение.

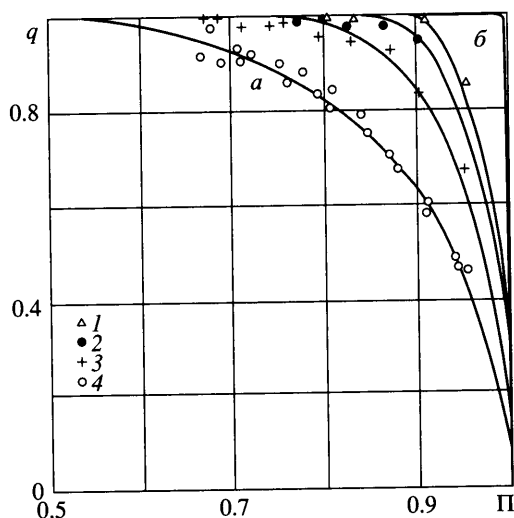
Система измерения боковой силы позволяет определять направление действия этой силы. Боковая составляющая реактивной силы в ходе одного опыта по мере изменения режима истечения меняет свое направление.

5. Дозвуковой режим истечения. Рассмотрим режим работы сопла VI, при котором высокое давление окружающей среды p_h оказывает влияние на течение газа в минимальном сечении. Наличие расширяющегося раструба сопла в этих условиях существенно влияет на расход газа через сопло. На фиг. 4 в качестве примера приводятся некоторые результаты, характеризующие зависимость безразмерного расхода $q = Q/Q_{\max}$ от отношения давлений Π , где максимальный расход

$$Q_{\max} = \mu \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1)/2(\gamma - 1)} \sqrt{\frac{\gamma P_0 F_*}{R \sqrt{T_0}}}$$

Здесь μ – коэффициент расхода сопла, γ – показатель адиабаты, R – газовая постоянная.

Кривая *a* на фиг. 4 соответствует случаю истечения газа через простое отверстие (без расширяющейся части), кривая *b* соответствует предположению об одномерном безотрывном изэнтропическом течении газа в раструбе с заданной степенью расширения сопла $F_*/F_a = 6$ ($M_a = 3.4$). Здесь F_a – площадь выходного сечения сопла. Экспе-



Фиг. 4. Зависимость расхода от отношения давлений Π . Точки – экспериментальные данные для конического сопла $M_a = 3.4$ и $2\alpha = 10^\circ$ (1), 15° (2), 25° (3), 35° (4)

риментальные значения безразмерного расхода располагаются в области, ограниченной этими кривыми.

Полученные результаты обобщаются эмпирической формулой, имеющей следующий вид:

$$q = \sqrt{1 - [(\Pi - \Pi_c)(1 - \Pi_c)^{-1}]^2} \quad (5.1)$$

$$\Pi_c = \Pi_*^\beta \quad \Pi_* = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$\beta = 1 - (1 - \sin\alpha)^2 \left(1 - \frac{F_*}{F_a}\right)^{0.17} \quad (5.2)$$

Эта аппроксимация получена по результатам испытаний конических сопел для широкого диапазона изменения углов раствора сопла ($2\alpha = 10\text{--}35^\circ$) и степени расширения сопла, соответствующей изменению числа Маха в диапазоне $M_a = 1.8\text{--}4$. Представленные данные свидетельствуют о четко выраженной зависимости расхода газа от угла раствора выходной части сопла: уменьшение угла раствора сопла приводит к увеличению секундного расхода. Формула (5.1) позволяет определить величину расхода газа через сопло при углах раствора расширяющейся части, не превышающих $2\alpha = 30^\circ$. Для сопел с углами раствора $2\alpha > 30^\circ$ рекомендуется использовать формулу для простого отверстия.

Величина Π_c , определяемая формулой (5.2), представляет собой такое отношение Π , которое разделяет диапазоны существования критического и докритического режимов течения в зоне минимального сечения сопла. При этом уменьшение угла раствора сопла и его удлинение увеличивают диапазон существования критического режима до отношения давлений, достигающего значения $\Pi \approx 0.9$, что существенно отличается от случая истечения через простое отверстие, при котором указанное $\Pi = \Pi_*$ (для $\gamma = 1.4$ значение $\Pi_* = 0.528$).

Для приближенной оценки величины расхода на докритическом режиме в случае профилированных сопел возможно использовать формулу (5.1), если условно заменить профилированное сопло некоторым эквивалентным коническим, построенным по координатам критического и выходного сечений.

При больших углах раствора сопла ($2\alpha > 30^\circ$) тяга сопла на дозвуковых режимах может быть вычислена как для простого отверстия, поскольку в этих условиях газовый поток практически не соприкасается со стенками сопла. Однако по мере уменьшения угла раствора сопла и соответственно его удлинения для одинаковых значений F_*/F_a тяговое усилие существенно снижается.

Заключение. При истечении газа из осесимметричных сопел в условиях глубокого перерасширения в широком диапазоне отношение давления в окружающей среде к давлению торможения перед соплом $\Pi \geq 0.25-0.35$ возникает несимметричное течение газа в расширяющейся части сопла.

На таких режимах для ряда сопел несимметричное истечение имеет стабильный характер и сопровождается возникновением боковой составляющей реактивной силы. Величина этой составляющей и диапазон режимов ее существования зависят от геометрических характеристик сопел и, в первую очередь, от угла раствора сопла и степени его расширения. Значение боковой составляющей может достигать величины $K_{py} = 0.15-0.20$ и более. Наибольшие значения достигаются как для конических сопел с углами раствора расширяющейся части $2\alpha \approx 25-35^\circ$, так и для профилированных сопел с углами раствора на выходе $2\alpha \approx 15^\circ$ при значении расчетного числа Маха $M_a \approx 3$. При этом боковая составляющая реактивной силы может превышать 30% от величины продольной составляющей на том же режиме истечения.

В условиях докритического режима работы сопла наличие расширяющейся части оказывает влияние на расход газа через сопло. Ширина диапазона Π , в котором этот режим проявляется, и величина расхода существенно зависят от размеров расширяющейся части и, в первую очередь, от угла ее раствора. Возможно существование критического режима течения до весьма высоких значений противодавления (более 0.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sadunas J.A., French E.P., Daines W.L.* Prediction of nozzle side forces which occur during staging // J. Spacecraft and Rockets. 1981. V. 18. № 5. P. 406–410.
2. *Ternhardt M., Hagemann G., Frey M.* Flow separation and side-load behavior of the vulcain engine // AIAA Paper. 1999. № 99–2763.
3. *Frey M., Hagemann G.* Flow separation and side loads in rocket nozzles // AIAA Paper. 1999. № 99–2815.
4. *Östlund J., Bigert M.* A sub scale investigation on side loads in sea level rocket nozzles // AIAA Paper. 1999. № 99–2759.
5. *Nave L.H., Coffey G.A.* Sea level side loads in high-area-ratio rocket engines // AIAA Paper. 1973. № 1284. 65 p.

Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
13.V.2003