

В разложение (4.3) входят параметры f и b : $f = (1 - gh) / ((1 - h)(1 - g))$, $b = (h - g) / ((1 - h)(1 - g))$. Параметр f меняется в пределах $-1 \leq f \leq 1$ и отражает смещение середины перфорированного участка относительно начала координат. Для симметричного случая $x_1 = -x_2$ параметр f равен нулю. При смещении перфорированной зоны в сторону положительных x f становится отрицательным, а при смещении в сторону отрицательных x — положительным. Параметр b ($0 \leq b \leq 1$) характеризует протяженность перфорированного участка. При $h = g$ параметр b равен нулю, а для всюду перфорированной стенки $b = 1$.

Последний член разложения (4.3) приобретает следующий вид для случая, когда камера не является замкнутой и давление в ней задано

$$-(\pi/H)^2 c_1 [h(1-g)/(g(1-h))]^{1-\gamma} \quad (4.4)$$

Разложение (4.3) переходит в разложение (4.2), когда $x_1 \rightarrow -\infty$, $x_2 \rightarrow +\infty$ ($b = 1$, $f = 0$). При $g \rightarrow h$ или $\gamma \rightarrow 0$ оба разложения совпадают с разложением (4.1) для сплошных стенок. Формула (4.3) позволяет оценить влияние границ на коэффициент подъемной силы.

Следует отметить, что в первую часть разложения (4.3), соответствующую обтеканию профиля нулевой толщины, коэффициент перфорации γ всюду входит с множителем b . Это означает, что влияние конечности перфорированного участка в этом случае эквивалентно уменьшению степени перфорации канала со всюду перфорированными стенками.

Кроме того, следует отметить, что выражение (3.8) при помощи очевидного соотношения $dw/dz = -i\lambda \zeta \Phi(\zeta)/H$ дает возможность вычислить скорость потока в любой точке области D вплоть до ее границ. Разложение (4.3) кроме традиционных оценок влияния ширины канала позволяет анализировать эффекты протяженности перфорированного участка (параметра b) и расположения этого участка относительно профиля (параметра f).

В заключение автор благодарит Ю. Б. Лифшица за постоянное внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гродзовский Г. Л., Никольский А. А., Свищев Г. П., Таганов Г. И. Сверхзвуковые течения газа в перфорированных границах. М.: Машиностроение, 1967. 144 с.
2. Маревцева Н. А. Обтекание тонкого профиля в канале с пронизаемыми стенками. Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 2, с. 111—117.
3. Мухелишвили Н. Г. Сингулярные интегральные уравнения. М.: Физматгиз, 1962.

Москва

Поступила в редакцию
25.XII.1980

УДК 533.697.4/5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНЫХ И ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХСОПЛОВОГО ЭЖЕКТОРА С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

ЛАШКОВ Ю. А., ШУМИЛКИНА Е. А.

Экспериментальные данные о характеристиках низконапорных газовых эжекторов с закруткой потока при подаче эжектирующего газа через дискретные сопла приведены, по-видимому, в единственной работе [1]. Однако исследования велись в сравнительно узком диапазоне изменения относительного перепада давления на активных соплах ($\sigma_{\max} \approx 2$), причем изучались только тяговые характеристики.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию не только тяговых, но и расходных характеристик низконапорного эжектора с закруткой потока в более широком диапазоне изменения относительного перепада давления на активных соплах ($\sigma_{\max} \approx 7$). Исследовался осесимметричный эжектор с четырьмя активными соплами, расположенными равномерно по окружности (фиг. 1). Низконапорный воздух поступал через мерный коллектор 1 в цилиндрическую камеру сужающихся 3 диаметром 70 мм. Испытания проводились с четырьмя вариантами сужающихся активных сопел 2, которые имели Г-образную форму и отличались углом γ отклонения потока от оси эжектора в меридиональном сечении ($\gamma = 0, 10, 20$ и 30°). Кроме того, поворотом оси державки сопла на угол φ , который мог меняться от 0 до 60° , обеспечивалась закрутка активного потока. Нулевому значению угла φ соответствовало положение сопел, при котором ось эжектора и ось сопла лежали в одной плоскости. Внутренний диаметр канала державки сопла составлял 8 мм, а диаметр среза

сопла был равен 4 мм. Оси сопел выступали внутрь камеры смешения на минимально возможную для данной конструкции величину h , составляющую 3–4 мм.

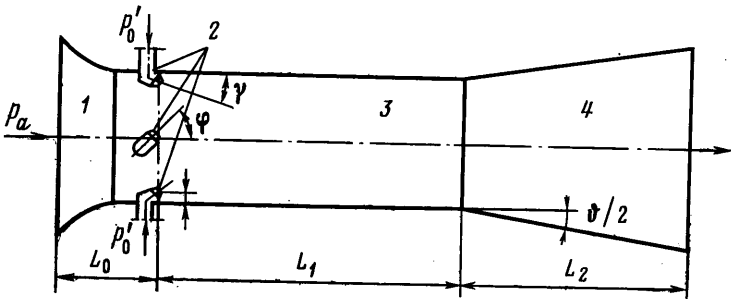
С помощью цилиндрических участков относительной длиной $l=1,5$ (здесь и далее линейные размеры L отнесены к диаметру камеры смешения $D=70$ мм) длина камеры смешения l_1 изменялась в диапазоне от 0,9 до 8,4 калибров. Относительная длина начального участка эжектора (до среза активных сопел) составляла 2,2 калибра. Модель консольно закреплялась на вертикальной пустотелой штанге с тензovesами, что позволяло измерять реактивную тягу, создаваемую эжектором.

При заданной длине камеры смешения эжектор испытывался как без выходного диффузора 4, так и с различными коническими диффузорами. Параметры применявшихся диффузоров варьировались в следующих пределах: $f=1,5-3,7$; $\phi=8-31^\circ$; $l_2=1,7$. Кроме того, использовались один более длинный диффузор с параметрами $f=2$, $\phi=6^\circ$, $l_2=3,8$. (Здесь f – степень расширения диффузора – отношение площади выходного и входного поперечных сечений, ϕ – полный угол раскрытия диффузора).

Параметр эжектора, вычисленный по геометрическим размерам, составлял $a=F_1/F'=75$, где F_1 – площадь поперечного сечения низконапорного потока, F' – суммарная площадь среза четырех активных сопел. В действительности параметр a , найденный по измеренным значениям расхода активного потока и давлению на срезе сопла, оказался несколько выше и изменялся от 83 до 88 (в зависимости от варианта комплекта сопел, отличающихся углом γ). Отмеченное различие в значениях параметра a может быть обусловлено не только погрешностями в изготовлении сопел, но также и отличием коэффициента сопла от единицы.

В процессе испытаний помимо реактивной тяги R , развиваемой эжектором, измерялись расход Q_1 низконапорного воздуха (с помощью мерного коллектора), расход Q' высоконапорного воздуха (с помощью стандартного мерного сопла), а также полное давление p_0' высоконапорного воздуха на срезе сопла. По измеренным параметрам определялись коэффициент эжекции $k=Q_1/Q'$, относительный перепад давления $\sigma=p_0'/p_a$, где p_a – атмосферное давление, а также относительная тяга $\Phi=R/R_1$, где R_1 – тяга идеального сопла с расходом, равным измеренному расходу высоконапорного воздуха.

Испытания проводились в такой последовательности: устанавливался нулевой угол ϕ поворота державок сопел и при минимальной длине $l_1=0,9$ камеры смешения снимались показания приборов на модели с различными выходными диффузорами, угол ϕ раскрытия которых увеличивался от опыта к опыту на величину $\Delta\phi=2^\circ$.



Фиг. 1

При этом расходные характеристики эжектора вначале улучшались, а затем при некотором запредельном угле ϕ начинали снижаться (тяговые характеристики эжектора начинали ухудшаться при меньших значениях угла ϕ). После этого испытания модели эжектора с камерой смешения такой длины прекращались, длина камеры смешения увеличивалась на $l=1,5$ и описанная выше процедура проведения испытаний повторялась до тех пор, пока с увеличением длины камеры смешения расходные характеристики эжектора не начинали ухудшаться (тяга эжектора начинала падать, как правило, при меньших значениях l_1). Затем устанавливался другой угол ϕ и повторялся вышеописанный цикл испытаний. По мере увеличения угла ϕ расходные характеристики эжектора вначале улучшались, а затем медленно снижались (тяга эжектора начинала падать всегда при меньших значениях угла ϕ). На этом процесс испытаний эжектора с выбранным вариантом сопел прекращался.

Из общих газодинамических представлений ясно, что характеристики эжектора должны в существенной мере зависеть от углов γ и ϕ . Увеличение угла γ отклонения активного потока от оси эжектора в меридиональном сечении приводит к росту величины теряемой осевой составляющей импульса и тяги, и это должно приводить к ухудшению характеристик эжектора. С другой стороны, увеличение в разумных

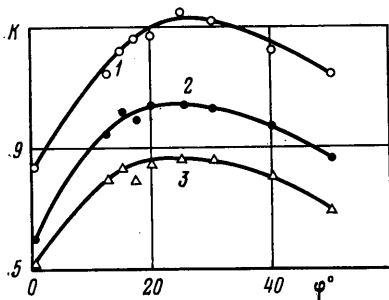
пределах угла γ снижает силу трения активного потока о стенки проточной части эжектора, что должно повышать его характеристики. Можно ожидать, что существует некоторый оптимальный угол γ , при котором будут реализованы наиболее высокие характеристики.

Угол ϕ поворота державки активного сопла качественно должен оказывать аналогичное влияние на характеристики эжектора. Действительно, с увеличением угла ϕ возрастают потери осевой составляющей импульса и тяги активного сопла. Однако при увеличении угла ϕ растет эффективная длина смещения струй, а следовательно, при увеличении угла ϕ должна уменьшиться оптимальная длина проточной части эжектора, что приведет к снижению потерь на трение потока о стенки камеры смешения. Следует ожидать поэтому, что существует также некоторый оптимальный угол ϕ , при котором реализуются наиболее высокие характеристики эжектора.

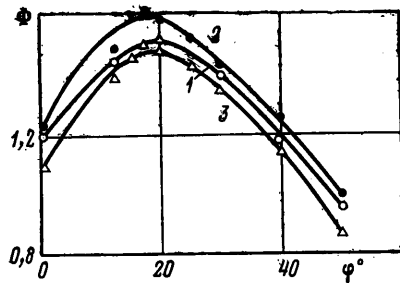
Влияние закрутки потока (угла ϕ) на характеристики эжектора при фиксированной геометрии проточной части ($l_1=2, 4; \gamma=30^\circ, \phi=12^\circ, l_2=1,7; f=1,8$) показано на фиг. 2 и 3, где для трех значений σ (кривая 1 соответствует значению $\sigma=2$, кривая 2 — $\sigma=4$ и кривая 3 — $\sigma=6$) приведены зависимости $k(\phi)$ и $\Phi(\phi)$. Как видно из представленных зависимостей, эжектор традиционной схемы (без закрутки потока) не является оптимальным с точки зрения получения наиболее высоких расходных и тяговых характеристик. При некотором отличном от нуля значении угла ϕ характеристики эжектора с фиксированной геометрией проточной части оказываются заметно выше, чем при $\phi=0$.

Отметим, что качественно аналогичное влияние угла ϕ на характеристики эжектора наблюдалось и для других исследованных конфигураций проточной части, причем эффективность закрутки всегда возрастала с уменьшением длины проточной части. Влияние угла γ отклонения активного потока от оси эжектора в меридиональном сечении исследовалось как при отсутствии закрутки ($\phi=0$), так и при ее наличии ($\phi>0$). Следует заметить, что при отсутствии закрутки наиболее высокие характеристики реализуются при $\gamma=10^\circ$, причем зависимости $\Phi(\sigma)$ имеют максимум, положение которого в зависимости от величины угла γ соответствует значениям относительного перепада давления, лежащим в диапазоне $\sigma=2,5-3,5$.

При наличии закрутки потока наиболее высокие значения Φ достигаются при $\gamma=20^\circ$, а наиболее высокие значения k — при $\gamma=0-10^\circ$. Закрутка потока не дает улучшения тяговых характеристик эжектора при $\gamma=0$, что объясняется потерями на трение активной струи о стенки камеры смешения. При $\gamma=0$ поворот державки



Фиг. 2



Фиг. 3

сопла на некоторый угол ϕ_0 приводит к увеличению угла встречи активной струи со стенкой камеры смешения в непосредственной близости от среза сопла, т. е. со стенкой камеры смешения сталкивается струя, обладающая высокой скоростью истечения и большой плотностью, так как активная струя не успела размыться. Известно, что сила трения при прочих равных условиях пропорциональна скоростному напору потока. Неразмытая активная струя обладает высоким скоростным напором, вследствие чего возрастают потери на трение с увеличением угла ϕ .

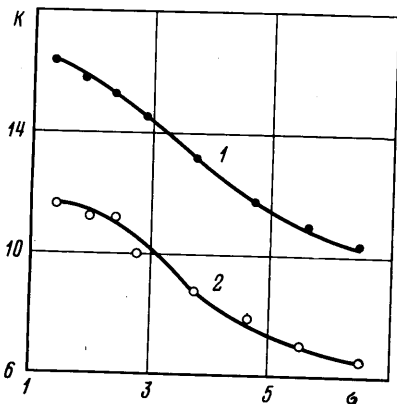
Отклоненная в меридиональном сечении на заметный угол γ струя при повороте державки сопла на тот же угол ϕ_0 проходит существенно больший путь до столкновения со стенкой камеры смешения. Такая струя оказывается больше размытой, чем при $\gamma=0$, вследствие чего скоростной напор активной струи в момент ее столкновения со стенкой оказывается существенно меньше, чем при $\gamma=0$.

В процессе экспериментального исследования было выяснено, что закрутка потока является эффективным средством увеличения предельных значений угла ϕ безотрывной работы выходного диффузора. Известно, что в эжекторе традиционной схемы величина ϕ не превышает $6-8^\circ$. В настоящих опытах за счет закрутки потока безотрывные углы работы диффузора достигали значений $\phi=20-25^\circ$.

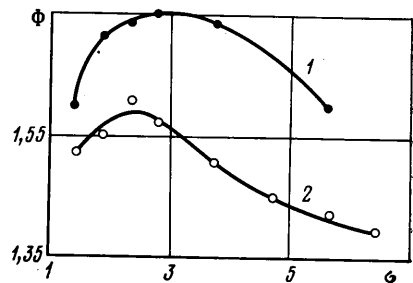
При течении закрученного потока в диффузоре значения Φ возрастают из-за неравномерного распределения статического давления по радиусу. Так как связанное с вращением ускорение потока направлено к оси, то, следовательно, туда же направлена и суммарная радиальная составляющая силы, действующей на любой выделенный элемент газа. Поскольку эта составляющая силы создается разностью статических давлений, действующих на выделенный элемент газа, постольку статическое давление в периферийных областях оказывается выше, чем в приосевых. Такой характер распределения статического давления по радиусу, естественно, должен затягивать момент отрыва пограничного слоя в диффузоре и приводить к увеличению предельных значений углов безотрывной работы диффузора.

В проведенных исследованиях значения Φ монотонно возрастали с увеличением угла φ и достигали величины $\Phi = 25^\circ$ при $\varphi = 50^\circ$ и $l_1 = 3,9$. Отметим, что при увеличении l_1 от 0,9 до 3,9 значения Φ при прочих равных условиях возрастали. Это указывает на то, что при дискретном подводе небольшого числа ($n=4$) активных струй необходима определенная длина камеры смешения для формирования закрученного течения с благоприятным градиентом давления по радиусу канала на входе в диффузор. При $l_1 \geq 5,4$ наблюдалось монотонное уменьшение Φ с ростом l_1 , что обусловлено уменьшением закрутки из-за влияния трения при больших относительных длинах камеры смешения, однако это имело место при больших, чем оптимальная, значениях относительной длины камеры смешения.

Увеличение угла Φ раскрытия диффузора (при фиксированной длине l_2) с ростом φ различным образом сказывалось на тяговых и расходных характеристиках эжектора. Вначале с ростом Φ (при прочих равных условиях) возрастали как коэффициент эжекции k , так и относительная тяга Φ . Затем при $\varphi \geq 12^\circ$ тяговые характеристики начинали падать, а расходные продолжали увеличиваться до тех пор, пока угол раскрытия диффузора не достигал величины $\Phi = \varphi$. При $\varphi > \Phi$ ухудшались и расходные характеристики эжектора. Снижение величины Φ при $\varphi > 12^\circ$, несмотря на увеличение коэффициента эжекции k , объясняется увеличением потерь осевой составляющей тяги с ростом угла раскрытия диффузора, а также потерь в диффузоре и увеличением потерь на трение потока о стенки камеры смешения с ростом расхода засасываемого воздуха.



Фиг. 4



Фиг. 5

Экспериментальным путем было установлено, что оптимальная величина угла φ зависит от длины проточной части эжектора, причем оптимальный угол по тяге Φ всегда меньше, чем оптимальный по коэффициенту эжекции k . Этот факт объясняется несколькими причинами. Во-первых, с ростом угла φ при прочих равных условиях увеличивается и угол Φ безотрывной работы диффузора, что как отмечалось выше, приводит к росту коэффициента эжекции k , а реактивная тяга R при этом увеличивается только с ростом безотрывных углов раскрытия диффузора до значений $\Phi \approx 12^\circ$. Во-вторых, с увеличением угла φ растут потери осевой составляющей тяги активных сопел по закону $R_0 = R \cos \varphi$ (здесь R_0 — осевая составляющая тяги сопел) и, в-третьих, с ростом угла φ растут гидравлические потери, обусловленные обтеканием низкоапорным потоком активных сопел, имеющих Г-образную форму (а как показано в работе [2], одинаковые потери давления в низкоапорной струе гораздо более существенно снижают реактивную тягу, нежели коэффициент эжекции).

Оптимальные значения угла φ представлены ниже:

l_1	0,9	2,4	3,9
$\Phi(R)$	15°	12°	8°
$\Phi(k)$	40°	28°	22°

Отсюда видно, что φ возрастают с уменьшением l_1 , а при одинаковых l_1 значения $\Phi(k)$ оказались примерно в 2,5 раза больше, чем $\Phi(R)$.

В проведенных исследованиях было установлено, что закрутка потока позволяет существенно снизить необходимую длину камеры смещения эжектора. При этом оптимальная по тяге длина $l_1(\Phi)$ камеры смещения, как правило, на 1–2 калибра меньше оптимальной по коэффициенту эжекции длины $l_1(k)$ камеры смещения: из-за наличия силы трения тяга достигает максимума при значениях l_1 меньших, чем те, при которых достигается максимум коэффициента эжекции.

Следует отметить, что при $\gamma=30^\circ$ наблюдалось более резкое, чем при $\gamma=0$, падение зависимостей $l_1(k)$ и $l_1(\Phi)$ с ростом угла φ . Это объясняется следующими причинами. При $\gamma=0$ в четырехсопловом эжекторе при всех углах φ в полной мере проявляется эффект многоствольности, заключающийся в снижении необходимой длины камеры смещения с ростом числа активных сопел [3, 4]. Для заметно отличающихся от нуля значений угла γ , например $\gamma=30^\circ$, при $\varphi=0$ и симметричном расположении сопел эффект многоствольности проявляется только на начальном участке камеры смещения до сечения слияния струй. Ниже этого сечения в результате интерференции четырех струй практически распространяется одна струя. Поэтому необходимая длина l_1 при $\varphi=0$ и $\gamma=30^\circ$ оказывается заметно больше, чем при $\varphi=0$ и $\gamma=0$. Для отличных от нуля значений угла φ эффект многоствольности проявляется на всей длине камеры смещения, так как в этом случае струи не пересекаются. В настоящих опытах зависимости $l_1(k)=f(\varphi)$ и $l_1(R)=f(\varphi)$ уже при $\varphi \geq 10^\circ$ практически сливались для всех исследованных значений угла γ . Сам факт снижения оптимальных значений $l_1(k)$ и $l_1(\Phi)$ с ростом угла φ объясняется увеличением эффективного пути смещения активных и пассивной струй с увеличением φ при неизменной длине проточной части эжектора.

Наиболее высокие тяговые и расходные характеристики исследованного эжектора ($n=4$, $a=75$) показаны на фиг. 4 и 5 (кривая 1 – с закруткой, кривая 2 – без закрутки). Как видно из приведенных данных, в зависимости от относительного перепада давления σ закрутка потока позволяет увеличить на 10–20% выигрыш в тяге и на 30–50% коэффициент эжекции. Отметим, что такое увеличение k достигнуто при одновременном снижении более чем вдвое необходимой длины камеры смещения. Для эжекторов с более короткой проточной частью применение закрутки позволяет при прочих равных условиях увеличить коэффициент эжекции более чем в 2 раза. Максимальный коэффициент увеличения тяги в данных опытах составил $\Phi=1,76$. Ниже указаны оптимальные геометрические параметры для четырехсопловых эжекторов без закрутки и с закруткой потока:

По тяге	Φ	γ	l_1	l_2	φ	f
	0	20°	2,4	4	6°	2
	10°	20°	2,4	3,8	6°	2
По расходу	0	0	5,4	4	6°	2
	30°	0–10°	2,4	1,7	20–22°	3

ЛИТЕРАТУРА

1. Ененков В. Г., Клячкин А. Л., Коротков В. С., Супрун В. М. Авиационные эжекторные усилители тяги. М.: Машиностроение, 1980. 135 с.
2. Лашков Ю. А., Шумилкина Е. А. Экспериментальное исследование тяговых и расходных характеристик многоствольных низконапорных эжекторов. – Уч. зап. ЦАГИ, 1980, т. 11, № 4, с. 154.
3. Байков В. С., Васильев Ю. Н. Исследование газового эжектора с многоствольным сверхзвуковым соплом высоконапорного газа. – В кн.: Лопаточные машины и струйные аппараты. Вып. 3. М.: Машиностроение, 1968, с. 147.
4. Жулев Ю. Г., Лашков Ю. А., Соловьев В. К., Шумилкина Е. А. Экспериментальное исследование многоствольных низконапорных эжекторов. – Тр. ЦАГИ, 1978, вып. 1956, с. 20.

Москва

Поступила в редакцию
2.XII.1980.