

## ГАЗОВЫЙ ЭЖЕКТОР С СОПЛОМ, ПЕРФОРИРОВАННЫМ ПРОДОЛЬНЫМИ ЩЕЛЯМИ

Ю. К. АРКАДОВ

(Москва)

Рассматривается возможность изменения условий «запирания» сверхзвукового газового эжектора путем установки на начальном участке камеры смешения цилиндрической стенки, перфорированной продольными щелями; эта стенка является продолжением высоконапорного сопла. Приводятся схема эжектора и результаты экспериментального исследования серии эжекторов с различными коэффициентами проницаемости перфорированной стенки. Проведено сравнение с эжектором классической схемы, показавшее, что на ряде режимов характеристики эжектора могут быть улучшены в несколько раз.

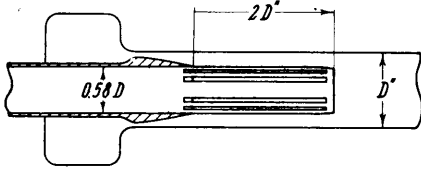
Оптимальным режимом работы газового эжектора при больших отношениях давлений смешиваемых газов и малых коэффициентах эжекции является критический режим. В этом случае сверхзвуковая высоконапорная струя, вытекающая в пространство с пониженным давлением, расширяется и поджимает низконапорную струю. М. Д. Миллионщиков и Г. М. Рябинков показали [1], что в минимальном сечении низконапорной струи на критическом режиме устанавливается звуковая скорость. В эжекторе с заданной геометрией при постоянном отношении полных давлений смешиваемых газов изменением степени сжатия нельзя увеличить коэффициент эжекции выше критического значения (см., например, [1], стр. 320). Наступление критического режима, как было показано в работе [2], ограничивает возможности газового эжектора, значительно снижая его максимальную степень сжатия и максимальный коэффициент эжекции по сравнению с тем, что дают уравнения механики без рассмотрения вопроса о совместимости струй в камере смешения. Поэтому одним из путей улучшения характеристик газового эжектора является изменение условий «запирания» низконапорной струи.

Изменение условий запирания может быть достигнуто, например, установкой на начальном участке камеры смешения (сразу же за срезом сопла) перфорированной стенки. Перфорация в стенке должна быть выполнена в виде продольных щелей. В случае круглых отверстий или поперечных щелей из-за конечной толщины стенки часть высоконапорного газа, прошедшая через нее, теряет осевую составляющую скорости и сама нуждается в эжектировании вместе с низконапорным газом. При этом характеристики эжектора ухудшаются. Если же стенка перфорирована продольными щелями, то высоконапорная струя при проходе через стенку сохраняет осевую скорость и способность эжектировать другой газ, изменяются лишь условия запирания.

Приближенные расчеты по одномерной теории показывают, что при идеальной работе перфорации (статическое давление по всему сечению запирания постоянно) и отсутствии смешения струй внутри перфорированного участка характеристики ряда сверхзвуковых эжекторов изменяются мало по сравнению с соответствующими эжекторами классической схемы. Если же прошедший через перфорированную стенку высоконапорный газ хотя бы частично смешивается с низконапорным газом до сечения запирания, то выигрыш в критических перепадах и коэффициентах эжекции получается значительным. Это связано с тем, что при смешении увеличивается пол-

ное и статическое давление низконапорного газа внутри перфорированного участка и соответственно уменьшается перепад статических давлений смешиваемых газов за перфорированным участком. Благодаря тому, что струи высоконапорного газа, прошедшие через перфорированную стенку, имеют малые поперечные размеры, они действительно успевают в значительной мере перемешаться с низконапорным газом до сечения запираания. Влияние вязкости на режимы запираания имеют место также и в классическом эжекторе, что отмечалось в работах Г. Л. Гродзовского и А. Ф. Равдина, однако там оно невелико и становится заметным лишь при очень малых коэффициентах эжекции.

Автором исследована серия газовых эжекторов с перфорированной продольными щелями стенкой длиной два калибра камеры смешения и коэффициентами проницаемости (отношение площади щелей к площади цилиндрической поверхности)  $n = 5, 10, 20, 30, 40, 50$  и  $100\%$ . Концы стенок были выполнены сплошными (без щелей) во избежание вибраций. Число щелей было равно восьми. Следует заметить, что эжекторы с коэффициентами проницаемости  $0$  и  $100\%$  являются эжекторами классической схемы. Они отличаются только длиной сопел и имеют близкие характеристики.



Фиг. 1

Эксперимент проводился на воздухо-воздушной эжекторной установке с центральным соплом низконапорного газа (фиг. 1), имеющей следующую относительную геометрию: отношение площадей низконапорной и высоконапорной струй —  $a = 0.5$ ; геометрическое число Маха сопла высоконапорного газа —  $M' = 2.84$ .

Температуры торможения смешиваемых газов были одинаковы. Характерное число Рейнольдса  $R$ , вычисленное по параметрам высоконапорной струи на входе в эжектор, менялось очень мало и было равно  $R = 5.6 \cdot 10^5 \div 6.4 \cdot 10^5$ .

Характеристики эжекторов даны в виде зависимостей приведенного расхода низконапорного газа  $q(\lambda_1)$  от отношения полных давлений смешиваемых газов  $\sigma$  и степени сжатия  $\epsilon$  только для критических режимов, поскольку лишь они представляют интерес, как наимыгоднейшие. Параметр  $q(\lambda_1)$  был выбран для иллюстрации работы серии газовых эжекторов из следующих соображений.

Во-первых, он достаточно полно характеризует процесс в эжекторе (при  $q(\lambda_1) = 1$  статические давления смешиваемых газов одинаковы; перепада давлений на стенке нет, поэтому характеристики всех испытанных эжекторов в этой точке теоретически должны совпадать).

Во-вторых, приведенный расход низконапорного газа на входе в эжектор во многих случаях является характеристикой объекта, для обеспечения работы которого создается эжектор, например, аэродинамической трубы. При постоянном значении  $\sigma$  коэффициент эжекции прямо пропорционален  $q(\lambda_1)$ , и выигрыш в приведенном расходе низконапорного газа соответствует выигрышу в коэффициенте эжекции.

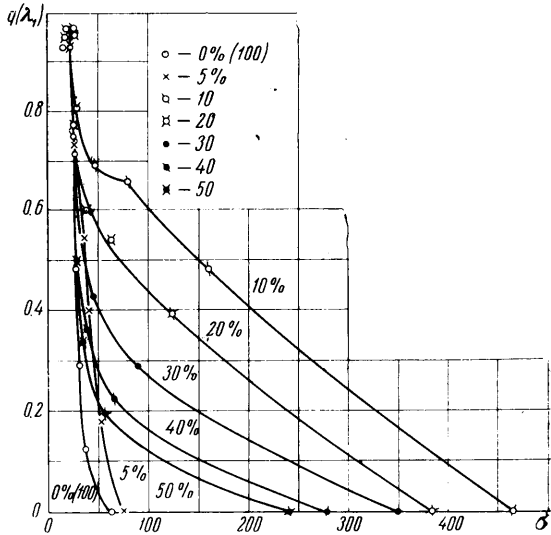
На фиг. 2 представлены характеристики  $q(\lambda_1) = f(\sigma)$  эжекторов с различными коэффициентами проницаемости. Как отмечалось выше, коэффициенты проницаемости  $0$  и  $100\%$  соответствуют эжекторам классической схемы, поэтому по фиг. 2 легко проследить влияние перфорированной стенки на работу эжектора. В области  $q(\lambda_1) \approx 1$  характеристики всех испытанных эжекторов совпадают. При меньших значениях приведенного расхода характеристики начинают расходиться, причем при всех коэффициентах проницаемости эжектор с перфорированной стенкой работает

лучше эжектора классической схемы. При постоянном  $\sigma$  увеличиваются критические значения  $q(\lambda_1)$  и, соответственно, коэффициенты эжекции, а при постоянном  $q(\lambda_1)$  эжекторы с перфорированной стенкой запираются при больших отношениях полных давлений. Например, при  $\sigma = 63$ , соответствующем нулевому приведенному расходу низконапорного газа в классическом эжекторе, в эжекторе с проницаемостью 10% приведенный расход низконапорного газа составляет 0.67. Критические отношения полных давлений при постоянных значениях  $q(\lambda_1)$  увеличиваются в несколько раз, например, при  $q(\lambda_1) = 0$  — в 7.7 раза.

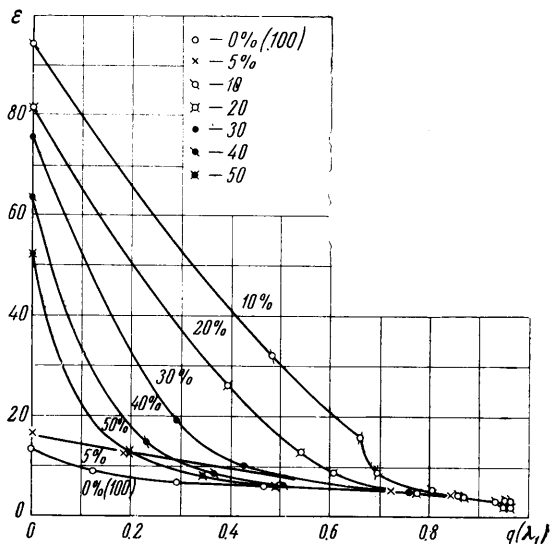
Зависимости степени сжатия от приведенного расхода низконапорного газа для различных коэффициентов проницаемости стенки показаны на фиг. 3. Наличие перфорированной стенки значительно увеличивает максимальную степень сжатия газового эжектора, причем сама абсолютная величина степени сжатия в ряде случаев становится сравнимой со степенями сжатия многоступенчатых эжекторов ( $\varepsilon = 50-100$ ). Увеличение максимальной степени сжатия при постоянном значении  $q(\lambda_1)$  происходит за счет незначительного (не более 10—15%) увеличения максимального давления высоконапорного газа, которое становится возможным благодаря изменению условий запираания эжектора.

На фиг. 4 представлены зависимости отношения степени сжатия эжекторов с перфорированной продольными щелями стенкой к степени сжатия классического эжектора от коэффициента проницаемости. Видно, что имеется оптимальный коэффициент проницаемости, составляющий

для эжектора данной геометрии примерно 10%. Эта проницаемость является для него оптимальной на всех режимах работы. Характеристики  $\bar{\varepsilon} = f(n)$  в области оптимума будут крутыми: при оптимальной проницаемости 10% выигрыш в степени сжатия будет 5—7 раз, в то время как при проницаемости 5% и 40—50% он составляет лишь 30—50%.



Фиг. 2



Фиг. 3

В диффузоре, расположенном за камерой смешения эжектора, имеются потери полного давления смеси из-за трения газа о стенки и потери, вызываемые отрывом потока от стенок из-за значительного положительного градиента давления. Трение газа о стенки камеры смешения также приводит к снижению полного давления смеси. Для классического эжектора эти потери, вызываемые вязкостью газа, составляют примерно 10—15% ( $\nu = 0.9—0.85$ ). Обычно они учитываются при расчете эжектора как экспериментально определенные поправки. Представляет интерес найти их и для эжектора с перфорированной продольными щелями стенкой.

Суммарный коэффициент восстановления полного давления в камере смешения и диффузоре  $\nu$  представляет собой отношение полученной экспериментально степени сжатия к расчетной на этом режиме. Расчетная степень сжатия определялась согласно данным работы [3] по формулам

$$\varepsilon = \frac{\sigma q(\lambda')(1+k)}{(1+a)q(\lambda'')}$$

$$z(\lambda'') = \frac{kz(\lambda_1) + z(\lambda')}{1+k}$$

$$k = \frac{aq(\lambda_1)}{\sigma q(\lambda')} \quad \left( z(\lambda) = \lambda + \frac{1}{\lambda} \right)$$

Здесь  $z(\lambda)$  — газодинамическая функция.

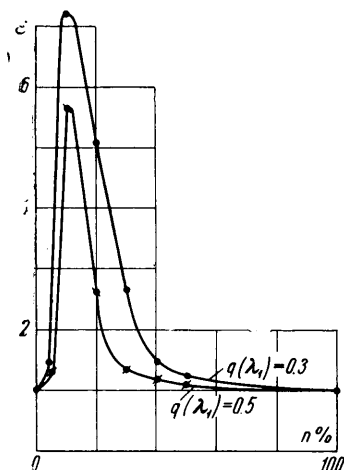
На фиг. 5 даны коэффициенты восстановления полного давления в классическом эжекторе и эжекторе с перфорированной стенкой. В зависимости от режима работы  $\nu$  в классическом эжекторе меняется в пределах 0.89—0.85 (линия 1). В эжекторе с перфорированной продольными щелями стенкой коэффициент восстановления полного давления примерно на 5% меньше (линия 2). Таким образом, наличие перфорированной стенки несколько увеличивает потери полного давления смеси, вызываемые трением, и, соответственно, понижает степень сжатия. Однако, как показало экспериментальное исследование, результаты которого изложены в настоящей статье, положительный эффект от сдвига критических режимов намного превосходит это снижение. Суммарный эффект практически на всей характеристике положительный, причем на многих режимах степень сжатия увеличивается в несколько раз.

Полученные результаты качественно могут быть распространены на все эжекторы, работающие на критическом режиме, в частности, на звуковой эжектор.

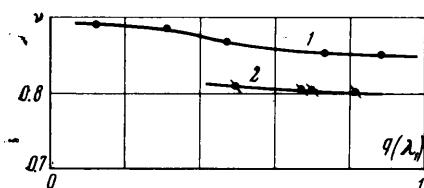
Поступило 13 VII 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. Изд. 2-е, Гостехиздат, 1953.
2. Харитонов В. Т. Исследование эффективности газового эжектора с цилиндрической камерой смешения. Теплоэнергетика, 1958, № 4.
3. Христианович С. А. О расчете эжектора. Сб. «Промышленная аэродинамика», М., ЦАГИ, 1944.



Фиг. 4



Фиг. 5