

УДК 621.4/6:533.6

ОДНОСТУПЕНЧАТЫЙ ЭЖЕКТОР БОЛЬШОЙ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ

А.В. СОБОЛЕВ¹, В.И. ЗАПРЯГАЕВ¹, В.М. МАЛЬКОВ²

¹Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
Новосибирск

²Балтийский государственный технический университет,
С.-Петербург

Изучаются свойства критического эжектора с центральным соплом эжектирующего газа и сужающейся камерой смешения. Расчет по одномерной теории показано влияние скорости эжектируемого газа на параметры эжектора при изобарическом процессе смешения в камере. Экспериментальный эжектор с соплом $M = 4,5$ и давлением эжектирующего газа в выходном сечении сопла $p = 0,09$ бар запускается при давлении, превышающем номинальное на 30 %. При замене расчетного сопла геометрически подобным соплом меньшего размера и повышении полного давления эжектирующего газа улучшается запуск эжектора, увеличивается коэффициент эжекции. В эксперименте на воздушном эжекторе получен коэффициент эжекции 0,15 при степени сжатия 10.

Эжекторы традиционно используются для откачки газов с низким давлением в атмосферу. Распространенной сферой применения эжекторов является их использование для эвакуации газов из рабочих камер аэродинамических труб высоких скоростей. Другое важное приложение они находят в системах восстановления давления химических лазеров. При давлении газа 0,1 бар и меньше обычно применяются многоступенчатые эжекторы. Своей технической простотой, однако, привлекателен в данном случае одноступенчатый эжектор, в котором степени сжатия достигают $\epsilon = 10-15$.

Известно, что сверхзвуковое течение смеси газов в камере эжектора формируется либо за счет достижения критической скорости эжектируемого газа в сечении запирания [1], либо в случае докритической скорости в сечении запирания при ускорении эжектируемого газа посредством механизма смешения. Второй вариант эжектора предпочтителен из-за отсутствия ограничения на расход эжектируемого газа. Пример такого эжектора с сужающейся камерой смешения и соплом эжектирующего газа, размещенным в емкости с откачиваемым газом, представлен в [2]. Задача данной работы — исследование одноступенчатого эжектора высокой степени сжатия с докритической скоростью в сечении запирания, повышение его эффективности.

Эжектирующий газ высокого давления часто подготавливается в газо- или парогенераторах. Затраты на сжатие газа и термодинамический коэффициент полезного действия в качестве критерия эффективности в этом случае не имеют первостепенного значения. В первую очередь эжектор характеризуется затратами эжектирующего вещества. Требуется обеспечить минимум расхода эжектирующего газа при заданном расходе эжектируемого газа или максимум коэффициента эжекции k при обеспечении требуемой степени сжатия. Для сравнения эжекторов с разной степенью сжатия расходные характеристики удобно оценивать произведением $k\epsilon$.

© Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М., 2005

РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В прямой задаче расчета течения в эжекторе с заданными геометрией и параметрами газов на входе могут применяться вычислительные методы с большими затратами времени [3]. В решении обратной задачи при неопределенных параметрах и геометрии предпочтение отдается простым экономичным методам расчета.

Изучается эжектор с центральным соплом эжектирующего газа, расположенным во входном сечении 1 камеры смешения (рис. 1). Процесс смешения и формирование одномерных профилей газодинамических величин завершаются в сечении 2. Далее одномерный поток попадает в сверхзвуковой диффузор, предназначенный для преобразования с малыми потерями сверхзвукового течения в дозвуковое. Сверхзвуковой диффузор состоит из поджатия 2–3, в котором скорость сверхзвукового течения уменьшается, и горла 3–4, в котором это течение преобразуется в дозвуковое в цепочке ударных волн. В дозвуковом диффузоре поток замедляется до малых скоростей и происходит восстановление статического давления до атмосферного.

Смешение в камере эжектора происходит при давлении, близком давлению эжектируемого газа, поэтому приемлемой идеализацией смешения для рассматриваемых эжекторов является изобарический процесс. Соотношения теории изобарического смешения следуют из законов сохранения массы, энергии и количества движения

$$\begin{aligned} G_p + G_s &= G_2, \\ G_p I_p + G_s I_s &= G_2 I_2, \\ G_p u_p + G_s u_s &= G_2 u_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Последнее соотношение системы (1) следует из закона сохранения импульса при постоянном давлении p и пренебрежении сопротивлением трения.

Наиболее простые расчетные формулы получаются из (1) при одинаковых смешиваемых газах и равных температурах торможения

$$\begin{aligned} T_2 &= T_p = T_s, \\ \lambda_2 &= \frac{\lambda_p + k\lambda_s}{1+k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $k = G_s / G_p$.

При равном статическом давлении во всех сечениях камеры смешения

$$p_{02} / p_{0s} = \pi(\lambda_s) / \pi(\lambda_2). \quad (3)$$

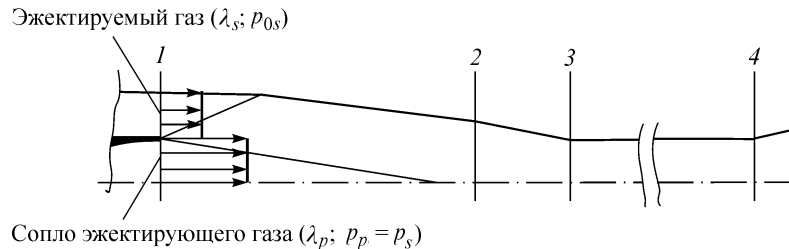


Рис. 1. Схема эжектора.

1–2 — камера смешения, 2–3 — поджатие; 3–4 — горло.

Используя формулу расхода [4]

$$G = m \frac{\rho F y(\lambda)}{\sqrt{T}}$$

(m — постоянная величина для каждого газа), получим

$$F_1 / F_p = 1 + k y(\lambda_p) / y(\lambda_s), \quad (4)$$

$$F_2 / F_p = (1 + k) y(\lambda_p) / y(\lambda_2).$$

При вариации λ_s изменяется статическое давление

$$p = p_{0s} \pi(\lambda_s)$$

и при постоянном расходе G_p и коэффициенте скорости λ_p сечение F_p определяется как

$$F_p / F_p(1) = \pi(\lambda_s = 1) / \pi(\lambda_s), \quad (5)$$

где $F_p(1)$ — площадь сечения F_p при $\lambda_s = 1$.

Примем, что на участке 2–3 эжектора смесь газов сжимается изобарично. Коэффициент скорости на входе в горло равен λ_3 , сечение

$$\begin{aligned} F_3 &= F_2 q(\lambda_2) / q(\lambda_3), \\ P_{03} &= P_{02}. \end{aligned} \quad (6)$$

В горле полное давление уменьшается на величину потерь в скачке

$$P_{04} = P_{03} q(\lambda_3) / q(\lambda_4), \quad (7)$$

где $\lambda_4 = 1 / \lambda_3$.

В формулах (1)–(7) приняты обозначения: G — массовый расход, I — энтальпия, u — скорость, p_0 — полное давление, λ — коэффициент скорости, F — площадь, $\pi(\lambda)$, $y(\lambda)$, $q(\lambda)$ — газодинамические функции давления и расхода [4]. Индексы: p — (primary) эжектирующий газ, s — (secondary) эжектируемый газ.

Давление на выходе дозвукового диффузора легко определяется при известном коэффициенте восстановления полного давления $\sigma_d = 0,90 - 0,97$ [4].

Формулы (2)–(7) позволяют при постоянном коэффициенте скорости λ_p в сопле эжектирующего газа, постоянном давлении p_{0s} эжектируемого газа и постоянных расходах G_p и G_s определить полные давления P_{02} , P_{04} и площади сечений 1, 2 и 6 в зависимости от коэффициента скорости λ_s .

Далее представляются результаты расчета для воздуха (показатель адиабаты $\gamma = 1,4$) и для газа с $\gamma = 1,25$ (рис. 2, 3). Расчет выполнен для сопла с числом Маха $M_p = 4,5$. Коэффициент эжекции принят равным $k = 0,2$. Полные давления P_{04} посчитаны для двух вариантов эжектора: для изобарического, в котором горло является непосредственно продолжением камеры смешения $F_3 = F_2$, и для эжектора, в котором поток поджимается, коэффициент скорости на входе в горло λ_3 равен 1,7. Для второго варианта (см. рис. 3) приводится сечение горла F_3 .

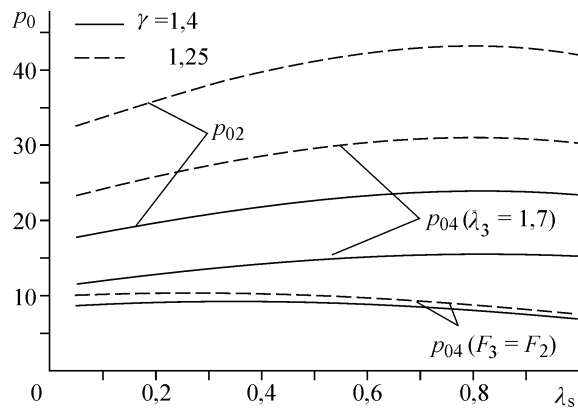


Рис. 2. Полное давление.

Полные давления отнесены к давлению p_{0s} , площади — к постоянной величине — площади выходного сечения сопла эжектирующего газа $F_p(1)$.

Полученные зависимости позволяют охарактеризовать ряд свойств эжектора.

В газе с показателем адиабаты $\gamma = 1,25$ коэффициент скорости λ_p равен 2,54 вместо $\lambda_p = 2,19$ при $\gamma = 1,4$, поэтому полное давление p_{02} в конце камеры смешения почти вдвое выше (см. рис. 2). Уменьшение показателя адиабаты эжектирующего газа повышает эффективность эжектора.

В изобарическом эжекторе максимальная степень сжатия невелика $p_{04}/p_{0s} = 9-10$ и достигается при $\lambda_s = 0,3-0,4$. Подобный максимум получен в [2], он обусловлен уменьшением потерь в горле по сравнению с потерями при более высоких значениях λ_s . В эжекторе с поджатием при уменьшенном сечении горла потери снижаются. Так, при $\lambda_3 = 1,7$ потери составляют треть давления p_{02} .

Реализация эжектора с малой скоростью эжектируемого газа $\lambda_s < 0,3$ нецелесообразна из-за чрезмерного увеличения в нем входного сечения F_1 (рис. 3). Максимальное полное давление в эжекторе с поджатием потока достигается при $\lambda_s \approx 0,8$. Однако при $\lambda_s = 0,3-0,4$ эжектирующая струя имеет меньшие размеры (см. формулу (5)) и распространяется в спутном потоке меньшей скорости, в этом случае длину камеры смешения и потери на трение можно уменьшить.

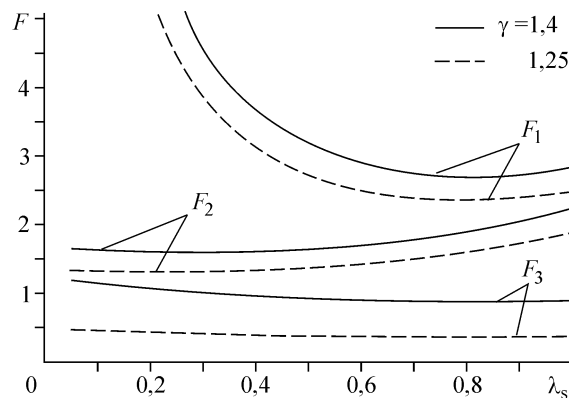


Рис. 3. Характерные сечения эжектора.

Вследствие этого, различие в степенях сжатия в реальном эжекторе в диапазоне $\lambda_s = 0,3-0,8$ становится несущественным. Определенность в выборе λ_s появляется, если учесть, что при малых $\lambda_s \approx 0,4$ уменьшается разность площадей F_2 и F_3 . Это означает уменьшение длины участка поджатия 2, 3 и общей длины эжектора, что является доводом в пользу малых значений λ_s .

Для воздушного эжектора расчет дал максимальную степень сжатия на входе в дозвуковой диффузор $\varepsilon = 15,5$ при коэффициенте эжекции $k = 0,2$. Для сравнения приводятся параметры оптимального воздушного эжектора с цилиндрической камерой смешения, полученные в [5] при аналогичных допущениях. При перепаде давлений 100 и коэффициенте эжекции 0,2 получена значительно более низкая степень сжатия 5,4.

Представленные формулы можно использовать в приближенном расчете эжектора. Кроме того, необходимо учитывать, что для рассматриваемой схемы и степеней сжатия 10 – 15 учет потерь приводит к снижению полного давления p_{04} примерно наполовину. При откачке другого газа или разных абсолютных температурах коэффициент эжекции пересчитывается с использованием приближенного соотношения [4, 6]

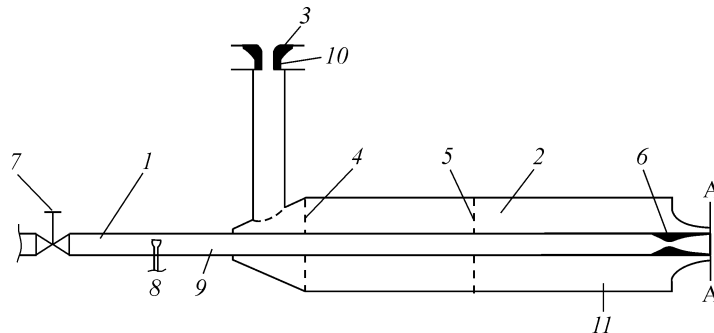
$$k_{др} = k \sqrt{T_p / T_s} \sqrt{\mu_s / \mu_p}. \quad (8)$$

Здесь T — абсолютная температура, μ — молекулярный вес.

Недостатком соотношений (2)–(8) является необходимость подбора коэффициента эжекции при создании эжектора на заданную степень сжатия. Более строгая теория должна обеспечивать расчет на заданную степень сжатия, учитывать разнородность газов, реальное распределение давления на стенках эжектора и сопротивление трения.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальное исследование позволяет выявить влияние процесса запуска, неизобаричности течения в камере смешения и других факторов, не учтенных расчетной схемой, на свойства эжектора. Эксперименты выполнены на воздушном эжекторе на установке, схема которой показана на рис. 4. Расход эжектирующего газа регулируется задвижкой и рассчитывается по критическому сечению сверхзвукового сопла и полным температуре и давлению в трубопроводе. Расход эжектируемого газа



1 — трубопровод высокого давления; 2 — камера низкого давления; 3 — сменное мерное сопло; 4 — перфорированная плита с коэффициентом гидравлических потерь $\zeta = 70$ [7]; 5 — перфорированная плита $\zeta = 50$; 6 — сверхзвуковое сопло; 7 — задвижка; 8 — термопара; 9 — замер давления; 10 — замер давления в цилиндрическом участке мерного сопла; 11 — замер давления эжектируемого газа; А-А

входное сечение эжектора.

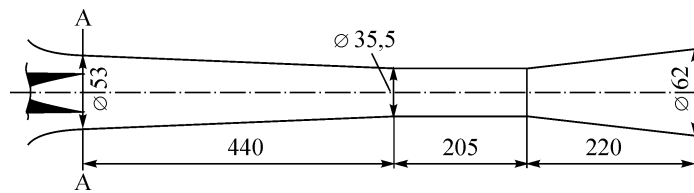


Рис. 5. Контур эжектора.

рассчитывается по давлению и температуре в зале, давлению в цилиндрическом участке мерного сопла и его площади. Степень сжатия определяется как отношение атмосферного давления к полному давлению эжектируемого газа.

Измерение давлений по тракту эжектора проводилось при фиксированном давлении эжектирующего газа датчиками, присоединенными к дренажным точкам. Использовались тензорезистивные датчики давления Siemens КРУ43А с динамическим диапазоном (0–1,6) бар. Автоматизированная система сбора данных собрана на основе многофункциональной платы Advantech PCI-1710HG. Для увеличения числа измерительных каналов использован мультиплексор Advantech PCLD-788. Точность измерения давления оценивается в 0,001 бар. Для уменьшения случайных ошибок каждый зарегистрированный отсчет получен осреднением десяти замеров.

Контур эжектора (рис. 5) образован коническими и цилиндрическими поверхностями. Первоначально было установлено профилированное сопло эжектирующего газа с $M = 4,5$, $D = 30$ мм.

При откачке агрессивных сред или при “ударном” запуске газодинамических установок эжектор запускается первым. В связи с этим уделяется внимание исследованию холостого режима эжектора. Характеристика холостого режима показана на рис. 6. При повышении давления эжектирующего газа установление критического режима происходит при давлении 25,1 бар. При запуске давление в камере низкого давления изменяется от докритического значения $p_{0s} \approx 0,5$ бар до $p_{0s} \approx 0,006$ бар. При понижении давления эжектирующего газа, обратный переход от критического режима в камере смешения к докритическому происходит при более низком давлении $p_{0p} = 20$ бар. Распределение давления вдоль стенки камеры смешения при $p_{0p} = 24$ бар на докритическом и критическом режимах показано на

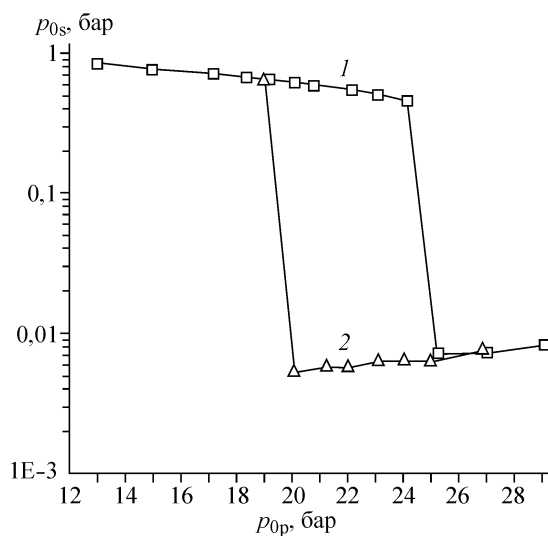


рис. 7 треугольниками.

Из условия равенства расходов эжектирующего газа на холостом режиме в горле сопла и на входе в дозвуковой диффузор, при запирации горла эжектора выполняется

$$p_{0p} F_* \approx 1,1 p_h F_4 q(\lambda_4).$$

Здесь p_h — атмосферное давление, $1,1 p_h$ — давление на входе в дозвуковой диффузор. При запирации из-за неравномерности

Рис. 6. Запуск эжектора. p_{0p} растет (1), убывает (2).

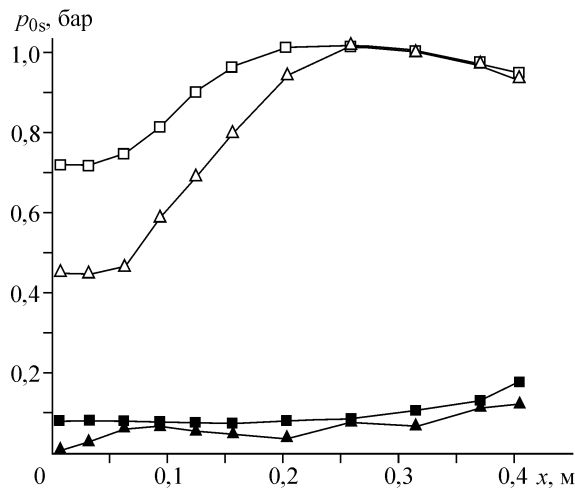


Рис. 7. Давление на стенке камеры.

профиля скорости в горле $q(\lambda_4)$ приблизительно равно 0,95. Давление запираания p_{0p} равно 24,3 бар ($d_* = 7,36$ мм). Давление запуска близко давлению запираания, поэтому уменьшение сечения горла в этом эжекторе невозможно.

Для измерения нагрузочной характеристики эжектор запускался на холостом режиме, затем через мерное сопло подавался эжектируемый газ. Нагрузочная характеристика измерялась при понижении давления эжектирующего газа. За редкими исключениями, на критических режимах эжектора в мерном сопле также реализуется критический режим течения, т. е. расход эжектируемого газа поддерживается постоянным. Пример нагрузочной характеристики, полученной при использовании мерного сопла с диаметром цилиндрической части $d = 12$ мм представлен на рис. 8 квадратами. Наибольший коэффициент эжекции на критическом режиме достигается при предсрывном давлении $p_{0p} = 19$ бар. Переход от критического режима к докритическому происходит при давлении эжектирующего газа меньше

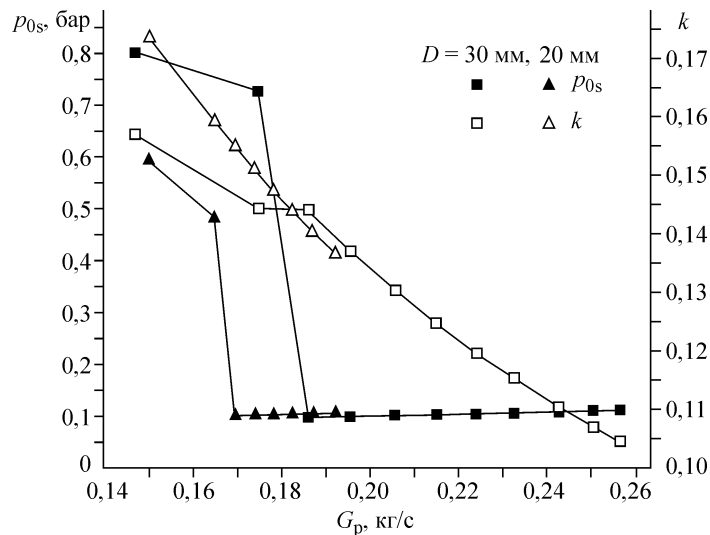


Рис. 8. Нагрузочные характеристики.

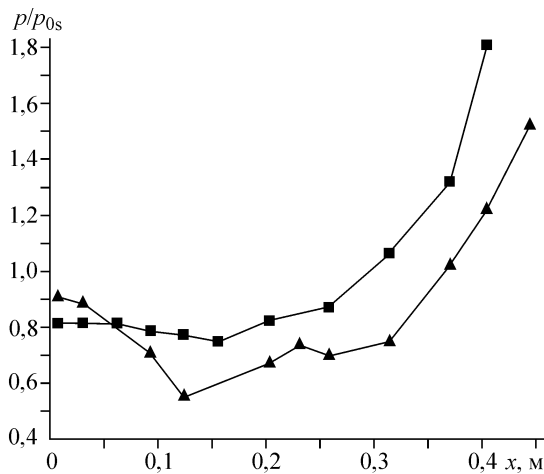
19 бар. Давление эжектируемого газа при срыве критического режима возрастает более чем в 7 раз. Коэффициент эжекции при этом изменяется мало. Критический режим многократно эффективнее докритического. Давление на стенке эжектора на критическом режиме при $p_{0p} = 19$ бар и на докритическом режиме при $p_{0p} = 18$ бар показано на рис. 7 квадратами. Высокая эффективность эжектора на критических режимах порождается малой величиной силы сопротивления давления на сужающихся стенках камеры смешения.

На критическом режиме градиент давления перед входом в горло $dp/dx = 1,4$ бар/м, меньше градиента в горле, равного 3,4 бар/м. Это свидетельствует о том, что длины горла 5,8 калибра достаточно для размещения в нем псевдоскачка.

Для определения влияния размеров сопла эжектирующего газа на свойства эжектора вместо сопла с диаметром выходного сечения $D = 30$ мм установлено геометрически подобное сопло $D = 20$ мм. Для сохранения значений расхода и импульса полное давление в этом сопле надо увеличить в 2,25 раза, т. е. до 56,5 бар при запуске на холостом режиме. Однако, запуск эжектора происходит при более низком давлении $p_{0p} = 42,5$ бар, т. е. при расходе $G_p = 0,19$ кг/с вместо $G_p = 0,24$ кг/с при использовании предыдущего сопла.

Нагрузочная характеристика эжектора с соплом $D = 20$ мм показана на рис.8 треугольниками. Срыв критического режима происходит при пониженном расходе эжектирующего газа $G_p \approx 0,17$ кг/с. Коэффициент эжекции на предсрывном режиме увеличился до 0,155. Уменьшилось полное давление эжектируемого газа на докритическом режиме. Качество эжектора при степени сжатия $\varepsilon = 10$ возросло.

Для более детального анализа целесообразно сопоставить параметры эжектора с двумя рассматриваемыми соплами при одном расходе эжектирующего газа $G_p = 0,19$ кг/с. Нерасчетности струй эжектирующего газа $n = p_p / p_s$ составляют соответственно 0,94 и 1,75. Сопло $D = 30$ мм находится в режиме, близком расчетному, сопло $D = 20$ мм — в режиме недорасширения. Далее сопла именуется расчетным и недорасширенным соответственно. Импульсы эжектирующего газа в выходных сечениях сопел совпадают. Коэффициент скорости эжектируемого газа λ_s во входном сечении эжектора для расчетного сопла равен 0,58, для недорасширенного — 0,41. Суммарный импульс газов за счет разных λ_s во втором случае на



2 % выше. Ускорение недорасширенной струи во втором случае приводит к снижению давления в камере эжектора (рис. 9). Если принять, что при $x > 0,1$ м снижение давления составляет в среднем $0,2p_{0s}$, то это эквивалентно увеличению импульса на входе в горло на 1,2 %. Суммарно, импульс во

Рис. 9. Давление в камере.

■ — расчетное сопло, ▲ — недорасширенное сопло.

втором случае на 3,2 % выше. Используя формулу расхода в зависимости от статического давления, можно определить коэффициенты скорости λ_3 на входе в горло. Число λ_3 в первом случае составляет 1,64, во втором — 1,76. Далее, используя формулу для определения импульса через полное давление, вычисляем полное давление на входе в горло p_{03} . Во втором случае оно на 30 % выше. Полное давление p_{04} на входе в дозвуковой диффузор, несмотря на более высокие потери в горле, во втором случае также на несколько процентов выше. Благодаря этому критический режим сохраняется при уменьшении расхода эжектирующего газа $G_p < 0,19$ кг/с. Таким образом, уменьшение размера сопла и повышение давления в нем обеспечивают повышение полного давления в камере эжектора при несущественном влиянии на суммарный импульс.

При использовании недорасширенного сопла диаметром 20 мм струя эжектирующего газа расширяется в камере от давления в сопле $1,66p_{0s}$ до давления $0,55p_{0s}$ на расстоянии $x = 0,123$ м (см. рис. 9, обозначение экспериментальных точек треугольниками). Поперечный размер недорасширенной струи достигает максимума на расстоянии около трех калибров от сопла, т. е. при $x = 0,06$ м. Это положение сечения запирания по теории для цилиндрических камер. Судя по давлению, течение в этом сечении докритическое. В сужающейся камере сечение запирания смещается вниз по потоку. Поэтому важно исключить достижение критической скорости в эжектируемом газе вплоть до точки встречи внешней границы слоя смешения со стенкой эжектора. Для этого сечение эжектора в рассматриваемой точке не должно быть меньше определенной расчетной величины.

При давлении эжектируемого газа ниже давления запирания, эффективность эжектора снижается. В таблице представлены характеристики эжектора с двумя мерными соплами на предсрывных режимах. Видно, что при минимальных размерах использованных сопел запирание эжектируемого газа приводит к повышению его полного давления и снижению эффективности эжектора.

Представляет интерес вопрос об использовании для других газов результатов экспериментов на воздушном эжекторе. При замене эжектируемого газа выполняется приближенное подобие течения в эжекторе. Коэффициент эжекции пересчитывается с использованием соотношения (8). Сложнее решается вопрос о замене обоих газов. В этом случае газодинамические характеристики и геометрические размеры экспериментального эжектора можно скорректировать на другой эжектирующий газ на основе соотношений (2)–(7). После этого производится замена эжектируемого газа с соответствующим пересчетом коэффициента эжекции.

Диаметр		Давление		Степень сжатия ϵ	Коэффициент эжекции k	$k\epsilon$
мерного сопла d , мм	эжектирующего газа D , мм	эжектируемого газа p_{0s} , бар	минимальное в камере p/p_{0s}			
12	30	0,099	0,75	10,4	0,144	1,5
	20	0,1	0,55	10,1	0,155	1,56
10	30	0,075	0,71	13,6	0,105	1,43
	20	0,081	0,46	12,4	0,106	1,32

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критический эжектор с сужающейся камерой смешения имеет более высокие параметры по сравнению с другими известными схемами эжекторов. При степени сжатия 10 получен коэффициент эжекции 0,15. Улучшение расходной характеристики обеспечивается достижением высокого полного давления смеси газов в камере эжектора и минимизацией его потерь при преобразовании сверхзвукового течения в дозвуковое.

Эжектор с расчетным соплом запускается при расходе эжектирующего газа на 30 % выше номинального. Сечение горла в нем увеличено, это препятствует повышению эффективности. При использовании недорасширенного сопла улучшается запуск эжектора, увеличивается полное давление в камере смешения и коэффициент эжекции. В таком эжекторе прогнозируется дальнейшее улучшение расходной характеристики путем уменьшения сечения горла.

Полученные результаты позволяют в общих чертах определить области применения эжекторов с изобарическим смешением и эжекторов с недорасширенным соплом эжектирующего газа. В тех случаях, когда располагаемое давление эжектирующего газа ограничено или сечение горла не может быть меньше величины, требуемой на режиме прямого тока, целесообразно использовать эжектор с расчетным соплом. Такие условия характерны для аэродинамических труб. В системах восстановления давления химических лазеров можно использовать высокое давление эжектирующего газа и узкое горло эжектора. В этом случае более высокие параметры обеспечит эжектор с недорасширенным соплом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев Ю.Н.** К теории газового эжектора // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. — М.: Изд. ЦАГИ, БНИ, 1961. — С. 48–79.
2. **Keenan J.H., Neuman E.P., Lustwerk F.** An investigation of ejector design by analysis and experiment // J. Appl. Mech. — 1950. — Vol. 17, No. 3. — P. 299–309.
3. **Борейшо А.С., Савин А.В., Мальков В.М. и др.** Вычислительное моделирование газодинамических процессов в системах восстановления давления сверхзвуковых химических лазеров // Теплофизика и аэромеханика. — 2001. — Т. 8, № 4. — С. 639–646.
4. **Абрамович Г.Н.** Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. — 824 с.
5. **Васильев Ю.Н.** Газовые эжекторы со сверхзвуковыми соплами // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. — М.: Изд. ЦАГИ, БНИ, 1961. — С. 134–212.
6. **Schreiber M., Acebal R.** Multi-stage ejector methodology: model enhancement and comparison to high energy laser experiments. — AIAA Paper No. 88–2753, 1988.
7. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга, 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.

Статья поступила в редакцию 19 января 2004 г.