

УДК 621.4/6:533.6

ПРИМЕНЕНИЕ НАСАДОК ШЕВРОНОВ И ТАБОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРОВ*

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

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича, Новосибирск*

²*НПП “Лазерные системы”, С.-Петербург*

Изучаются свойства газовых эжекторов с сужающимися камерами смешения на докритических и критических режимах течения. Рассматривается процесс установления критического режима при запуске эжектора без расхода или с расходом низконапорного газа. Излагается механизм колебаний, возникающих при запуске с малыми расходами низконапорного газа.

Представляются результаты экспериментальных исследований по улучшению расходных характеристик посредством уменьшения длины камеры и соответствующего увеличения интенсивности перемешивания. В качестве устройств интенсификации смешения рассматриваются щелевые насадки, шевроны, табы. Наиболее высокая расходная характеристика получена при использовании сопла с табами.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются одноступенчатые критические эжекторы с центральным соплом рабочего газа и сужающимися камерами смешения при высоких степенях сжатия $\varepsilon \approx 10$. На расходные характеристики эжекторов оказывают влияние многие факторы, в том числе свойства газов, форма и геометрические размеры эжектора и сопла. Большое влияние на расходные характеристики оказывает диссипация механической энергии. В работе [1] изучался эжектор с камерой длиной 8,3 калибра. В экспериментах этой работы были получены расходные характеристики примерно вдвое меньше, чем дают расчеты без учета трения на стенках эжектора. Уменьшение потерь обещает ощутимый выигрыш в расходных характеристиках. Это достигается уменьшением длины камеры эжектора совместно с интенсификацией смешения. Для интенсификации смешения используются устройства формирования вихрей в струе рабочего газа, такие как щелевой насадок, шевроны, табы.

Щелевой насадок применен в [2] для задержки установления предельного режима. Для этого использовался насадок с малой проницаемостью стенок, это свойство насадка сохраняет значение для рассматриваемого эжектора, однако основное его назначение в данном случае — интенсификация смешения. Для этого используются насадки с высокой проницаемостью стенок — 60 %.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-01215) и НПП “Лазерные системы” (договор № 512-2005).

Шевроны (треугольные зубцы) изучаются с целью снижения шума струй турбовентиляторных двигателей на режимах недорасширения [3]. В то же время в [4] показано, что вырезы в кромке сопла позволяют на этих режимах существенно интенсифицировать смешение. В работе изучается возможность использования шевронов для повышения эффективности эжектора.

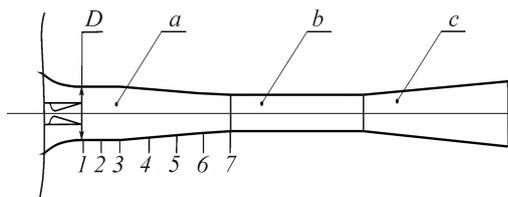
Табы, или выступы в струю, установленные на выходной кромке сопла, являются эффективными генераторами вихрей. В мировой литературе представлены табы в дозвуковых и звуковых соплах. Наиболее интенсивные вихри формируются табами треугольной формы, наклоненными к оси струи на 45° [5]. Недостатком использования табов является загромождение потока и связанные с этим потери импульса [6, 7]. В работе предлагается конструкция табов, пригодная для применения в сверхзвуковых струях.

Как показано в [8], расходные характеристики эжекторов улучшаются при выносе рабочего сопла в приемную камеру. В ней низконапорный газ увлекается рабочей струей, при этом во входном участке рабочей камеры формируется более выгодный по сравнению со ступенчатым струйный профиль скорости. В рассматриваемых нами эжекторах для эффективного действия устройств формирования вихрей используется недорасширенная струя рабочего газа. Коэффициенты эжекции при больших степенях сжатия невелики, $k \leq 0,25$. Благодаря этим обстоятельствам необходимость в конфузорном участке перед рабочей камерой отсутствует. Струйный профиль скорости формируется внутри цилиндрического участка рабочей камеры. Это заключение подтверждается результатами экспериментов: вынос сопла в приемную камеру при соответствующем уменьшении длины цилиндрического участка рабочей камеры не изменяет расходных характеристик эжектора.

Вихреобразующие элементы позволяют улучшить расходные характеристики, однако в то же время они затрудняют запуск эжектора. Испытания проведены на воздушных эжекторах. Импульс рабочего газа в выходном сечении сопла характеризуется газодинамической функцией импульса $z(\lambda)$, минимальное значение импульса в конце камеры смешения $z(\lambda)$ равно 2. Запуск и эжектирование осуществляются за счет разности импульсов, относительная величина которой для воздушной струи $(z(\lambda)-2)/2$ редко превышает 0,3. Это усложняет задачу определения размеров и формы вихреобразующих элементов и камеры, при которых обеспечиваются запуск и высокие расходные характеристики. Нередко эжекторы с высокими расходными характеристиками не реализуются из-за незапуска. Именно поэтому во вопросам запуска уделяется повышенное внимание.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Экспериментальная установка и методика измерений описаны в [1]. Здесь отметим, что подача низконапорного газа в камеру перед эжектором дозируется мерным соплом, на выходной кромке которого формируется отрывное струйное течение. Давление в камере при таком способе подачи низконапорного газа определяется свойствами эжектора. Использована автоматизированная система сбора и обработки данных, позволяющая в текущем времени контролировать давление в характерных точках. Эжектор, рис. 1, содержит камеру, горло и дозвуковой диффузор. Входное сечение эжектора совпадает с выходным сечением сопла. Диаметр сопла $d = 20$ мм, число Маха $M = 4,5$. Камера имеет входной участок цилиндрической формы диаметром $D = 53$ мм, далее следует конический участок с углом наклона образующей $3,5^\circ$.



сферической формы диаметром $D = 53$ мм, далее следует конический участок с углом наклона образующей $3,5^\circ$.

Рис. 1. Контур эжектора: *a* — камера, *b* — горло, *c* — дозвуковой диффузор; 1–7 — точки замера давления.

Рис. 2. Развертка четырехщелевого насадка.

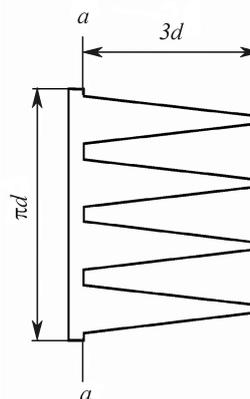
$a-a$ — плоскость выходного сечения сопла.

Перед входом в горло угол наклона уменьшен до 2° . Относительное сечение горла $\bar{A} = 0,45$. На стенке эжектора выполнены дренажные отверстия 1–7 для замеров статического давления.

Эксперименты выполнены с щелевыми насадками, шевронами и табами. Используются щелевые насадки цилиндрической формы длиной 3 калибра сопла, с восемью и четырьмя расширяющимися щелями, рис. 2. Длина камеры эжектора в экспериментах с щелевыми насадками и шевронами составляла 4,9 калибра, длина цилиндрической части — 1,7 калибра.

Шевроны выполнены в форме равнобедренных треугольников (рис. 3), расположенных без промежутков вдоль выходной кромки сопла. Плоскость шеврона направлена вдоль образующей сопла. Число шевронов изменялось от 2 до 12.

При сверхзвуковых скоростях большой наклон табов порождает чрезмерно высокое давление на поверхности таба и большие потери полного давления. Поэтому использованы табы с наклоном на 10° к оси струи относительно кромки сопла. Перед табом устанавливается косой скачок. Отношение статического давления за скачком к давлению перед скачком на расчетном режиме равно $p_2/p_1 = 2,76$. Результаты представляются для табов двух размеров: крупные табы с суммарной площадью поверхности, отнесенной к площади выходного сечения сопла, $\bar{A} = 0,57$ и малые табы с площадью $\bar{A} = 0,23$. Для обеспечения запуска длина цилиндрической части камеры в эжекторе с табами уменьшена на 0,6 калибра.



2. ЗАПУСК НА ХОЛОСТОМ РЕЖИМЕ

В химических лазерах используется запуск на холостом режиме, т. е. без расхода низконапорного газа. В газодинамических установках удобно запускать эжектор и управлять им при наличии расхода через установку, т. е. на рабочем режиме. Изучаются оба вида запуска.

Эжекторы с щелевым насадком и шевронами запускались на холостых режимах. Свойства запуска на холостом режиме выявляются при запуске с “чистым” соплом, который представлен распределениями давлений, показанными на рис. 4, a . По оси абсцисс отложено полное давление рабочего газа (нижний индекс p), по оси ординат — статические давления p_4 , p_7 в точках замера 4, 7 и полное давление низконапорного газа перед эжектором (индекс s). Отсутствие расхода низконапорного газа не меняет обозначений. Отношение давления в выходном сечении сопла к давлению низконапорного газа во входном сечении эжектора, посчитанное в предположении одномерного течения в сопле, достигает значения $n = 0,2$ при давлении 29 бар. Происходит запуск сопла. После его запуска давление в эжекторе

убывает значительно быстрее, чем до запуска. В камере возникают колебания. Несмотря на то, что замеры проводились через длинные дренажные трубки и каждый отсчет

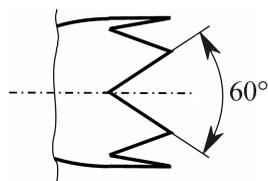


Рис. 3. Профилированное сопло с шестью шевронами.

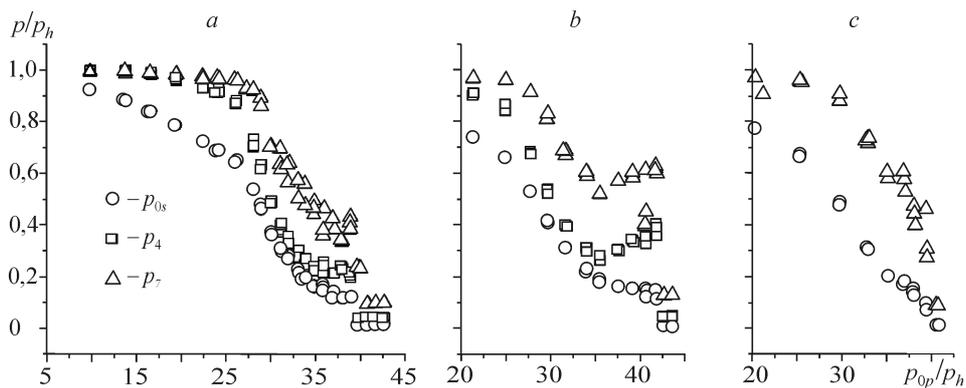


Рис. 4. Запуск эжектора без расхода низконапорного газа.

a — без насадки, *b* — с восьмищелевым насадком, *c* — с четырехщелевым насадком.

получен осреднением 10 мгновенных измерений, зарегистрированные давления в точках 4–7 имеют заметный разброс. Каждый замер при фиксированном давлении рабочего газа содержит три отсчета, все отсчеты нанесены на график. Среднее давление в точке 7 на входе в горло соответствует сверхзвуковому диапазону. Эти факты указывают на повторяющийся процесс срыва сверхзвукового течения и последующего его восстановления. Промежутки времени существования каждой фазы течения увеличиваются перед запуском. В этом случае, помимо регистрации разброса давлений датчиками, сверхзвуковое и срывное течения обнаруживаются на слух по изменению шума эжектора.

В сверхзвуковой фазе давление в камере уменьшается. Однако импульс струи еще недостаточен для поддержания сверхзвукового режима. Под действием противодавления псевдоскачок перемещается из горла в камеру, устанавливается срывное течение, давление в камере повышается. При давлении рабочего газа 39,5 бар импульс струи становится достаточным для поддержания критического режима. Струя присоединяется к стенке во входном участке камеры, колебания прекращаются. Статическое давление в камере снижается и соответствует установившемуся сверхзвуковому режиму течения.

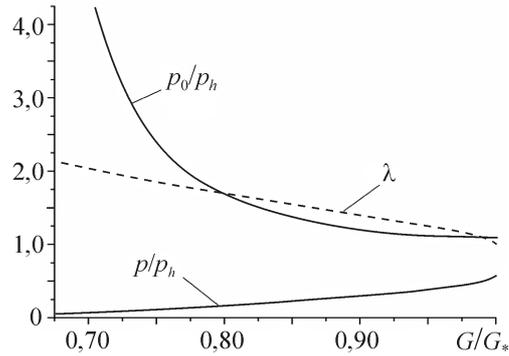
Полное давление установившегося сверхзвукового течения на входе в горло удовлетворяет соотношению

$$p_{07} \geq 1,1p_h + \Delta p, \quad (1)$$

где $1,1p_h$ — полное давление на входе в дозвуковой диффузор, p_h — атмосферное давление, Δp — потеря полного давления в скачке в горле эжектора. Правая часть формулы (1) представляет полное давление, полученное расчетом от выхода дозвукового диффузора до входа в горло. Это минимальное давление, при котором реализуется сверхзвуковое течение. Слева в формулу подставлено истинное полное давление потока на входе в горло p_{07} (точка замера 7, см. рис. 1). Сверхзвуковое течение реализуется, если истинное давление превышает расчетное или равно ему. Если соотношение (1) при установлении течения в сверхзвуковой фазе колебаний перестает выполняться, т. е. полное давление в потоке становится меньше расчетного, происходит срыв сверхзвукового течения, эжектор не запускается. В этом случае с увеличением расхода, как в сверхзвуковой, так и в срывной фазах колебаний, приведенная скорость в горле стремится к единице. Размах колебаний статического давления уменьшается. В пределе при запирании горла полное давление p_{07} стремится к $1,1p_h$ или статическое давление в точке 7 (см. рис. 1) —

$$p_7 \rightarrow 1,1p_h \pi(\lambda = 1) = 0,58p_h. \quad (2)$$

Рис. 5. Расчетные значения давления и коэффициента скорости на входе в горло.



Следовательно, результатом процесса запуска могут быть два различных состояния: критический режим или запертое горло. Запирание горла означает, что при существующих в камере потерях сечение горла недостаточно для пропуска необходимого для запуска расхода газа.

Дальнейшее увеличение расхода при запертом горле ведет к росту давления в камере, не изменяя картину течения в ней.

Величины одномерного сверхзвукового течения на входе в горло, посчитанные в соответствии с правой частью формулы (1), представлены на рис. 5 в зависимости от приведенного расхода $G/G_* = q(\lambda_d)$, где G_* — расход, при котором горло запирается, q — газодинамическая функция расхода, λ_d — коэффициент скорости на входе в дозвуковой диффузор. При расходе $G/G_* = 0,7$ полное давление более чем в 4 раза превышает атмосферное давление, коэффициент скорости на входе в горло $\lambda \approx 2$, статическое давление низкое, $p = 0,075p_h$. В эксперименте на критическом режиме получены близкие расчетным значения $p = 0,096p_h$ при $G/G_* = 0,71$.

При использовании устройств формирования вихрей потери в струе рабочего газа возрастают, из-за чего установление и поддержание критического режима происходит при повышенном давлении. Для примера рассматривается запуск эжектора с щелевыми насадками. Струя рабочего газа становится недорасширенной при давлении выше 36 бар. Происходит истечение радиальных струй из щелей насадка. Радиальные струи, истекающие из насадка с восемью щелями, получают узкими и дросселируются уже в начальном участке камеры (см. рис. 4, b). Потери увеличены и запуск происходит при давлении 43 бара. Запуск улучшается при использовании насадка с четырьмя расширяющимися щелями (см. рис. 4, c). Широкие радиальные струи сохраняют связь с ядром струи, диссипация в них невелика. Запуск происходит при незначительном превышении давления запуска с “чистым” соплом, $p_{0p} = 40,8$ бар.

При длинах цилиндрической части камеры меньших, чем те, на которых выполнены измерения, давление запуска сохраняется минимальным и постоянным, а расходные характеристики ухудшаются. Наоборот, при увеличении длины цилиндрической части камеры давление запуска быстро возрастает, расходные характеристики при этом улучшаются медленно. При дальнейшем увеличении длины эжектор не запускается. Наблюдается гистерезис запускной характеристики: после запуска при повышенном давлении рабочего газа давление можно снизить до минимального без срыва сверхзвукового режима течения. Измерения выполнены при длинах камеры, при которых давление запуска незначительно увеличено относительно минимальной величины.

3. ЗАПУСК НА РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

Запуск на рабочем режиме рассматривается на примере эжектора с табами. Давления в эжекторе с табами с площадью $\bar{A} = 0,57$ показаны на рис. 6, a. При давлении рабочего газа выше 33,5 бар статическое давление на входе в горло

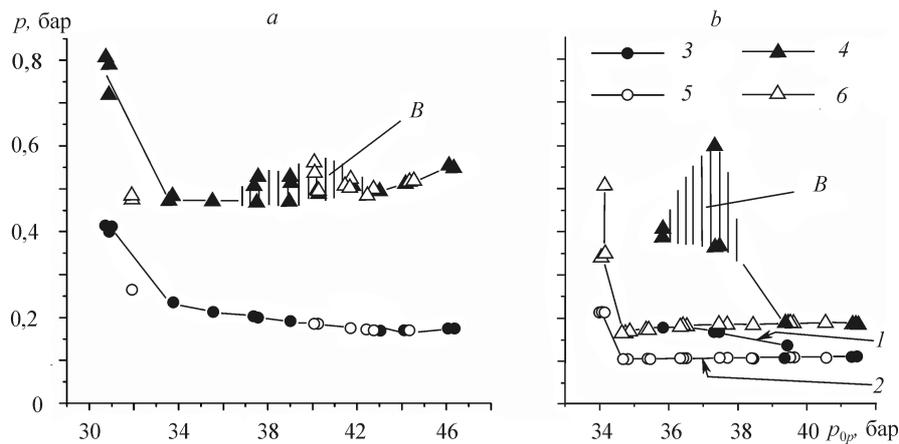


Рис. 6. Запуск с расходом низконапорного газа.

График *a* — площадь поверхности табов $\bar{A} = 0,57$, *b* — $\bar{A} = 0,23$; 1-2 — докритический и критический режимы, *B* — область колебаний, 3 — P_{0*} , 4 — p_7 (p_{0p} растет), 5 — p_{0*} , 6 — p_7 (p_{0p} убывает).

опускается ниже $0,58p_h$, что указывает на наличие сверхзвуковых скоростей. Сверхзвуковое ядро течения входит в горло. Колебаний на этом режиме нет. Приведенный расход в горле, который определяется с учетом расхода низконапорного газа, G/G_* приблизительно равен 0,7. Статическое давление на входе в горло, $p_7 \approx 0,45p_h$, значительно выше давления, которое должно быть при одномерном течении (см. рис. 5). Наблюдаемое различие свидетельствует о большой неравномерности профиля скорости.

Согласно теории критических режимов [9], рассматриваемый режим является докритическим. В камере и горле эжектора нет сечения, в котором течение является сверхзвуковым по всей ширине. Если бы такое сечение было, то отсутствовала бы возможность увеличить расход низконапорного газа через эжектор при неизменных полных давлениях газов и уменьшении противодавления. Поскольку приведенная скорость низконапорного газа в сечении запирания $\lambda \ll 1$, увеличение расхода возможно. Неравномерность профиля скорости на докритических режимах очень велика: скорость изменяется от дозвуковой в пристенных областях до высокой сверхзвуковой на оси эжектора.

При давлениях рабочего газа выше 37 бар в эжекторе возникают колебания. Как и при запуске на холостом режиме, максимальный размах колебаний наблюдается в окрестности входа в горло. Колебания при наличии расхода низконапорного газа точнее трактовать как перемещения псевдоскачка из горла в камеру и обратно. Дальнобойность струи при использовании крупных табов уменьшается, это приводит к повышению статического давления в горле, а следовательно и во всей камере. При давлении рабочего газа выше 46 бар горло эжектора заперто.

Запуск осуществляется успешно при использовании табов с площадью $\bar{A} = 0,23$ (рис. 6, *b*). Использование табов малого размера привело к сокращению области колебаний в этом эжекторе. При увеличении давления рабочего газа давление в камере уменьшается, и при $p_{0p} = 39,5$ бар устанавливается критический режим. Установление критического режима происходит скачком, давление снижается по всей длине камеры.

На критическом режиме внешний шум эжектора становится минимальным. Это обнаруживается на слух по тонкому свистящему звуку эжектора. Максимально ослабляются пульсационные процессы в эжекторе, уменьшаются потери механической энергии. Критический режим сохраняется при снижении давления рабочего

газа до 34,8 бар. Полное давление низконапорного газа в этом случае $p_{0s} = 0,105$ бар, коэффициент эжекции $k = 0,2$.

Установление критических режимов при запусках как без расхода, так и с расходом низконапорного газа происходит при давлении примерно 40 бар. Это является следствием того, что низконапорный газ мало изменяет баланс импульсов в эжекторе, течение в котором в первую очередь определяется импульсом рабочего газа. Колебания также наблюдаются в совместимых областях давлений рабочего газа. Это указывает на единый механизм колебаний при запусках на холостом и рабочем режимах. Колебания возникают при малых коэффициентах эжекции на докритических режимах. В представленном эжекторе они наблюдаются при коэффициенте эжекции до 0,2.

При более высоких значениях коэффициента эжекции заметных колебаний нет. Струя рабочего газа отсасывает низконапорный газ из камеры низкого давления, т.е. понижает давление низконапорного газа. Установление сбалансированных значений давления осуществляется путем распространения малых возмущений от выхода эжектора ко входу по дозвуковым областям течения. Дозвуковые области при малых коэффициентах эжекции узкие, распространения малых возмущений недостаточно, поэтому колебания являются дополнительным механизмом регулирования давления низконапорного газа во входном сечении эжектора.

На докритических режимах часто наблюдается пологий участок в распределении полного давления низконапорного газа. Пологий участок предшествует критическому режиму. Такой участок можно видеть на рис. 6, *a* — запуск на рабочем режиме с крупными табами при давлениях выше 34 бар или на рис. 4, *b* — запуск на холостом режиме при давлениях 35–43 бар. Наличие пологого участка предопределяет ступенчатое уменьшение полного давления низконапорного газа при установлении критического режима. В области ступенчатого изменения ухудшаются эксплуатационные свойства эжектора, поскольку исключается возможность регулирования давления эжектором. Из представленных материалов видно, что пологий участок обусловлен повышенным давлением на входе в горло.

4. РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Расходные характеристики получены для эжекторов с четырёхщелевым насадком, с шевронами и для эжектора с табами с площадью поверхности $\bar{A} = 0,23$.

Рабочий участок расходной характеристики эжектора с щелевым насадком представлен на рис. 7 (*1*). В крайней правой точке характеристики приведенный расход в горле эжектора $q(\lambda)$ приблизительно равен 1, т.е. это точка перегрузки [8].

Насадок обеспечивает перемешивание в этой точке при нерасчетности струи $n = 1,4$. В случаях, когда перемешивание не обеспечивается, экспериментальная точка отклоняется от расходной характеристики вверх. Однако щелевой насадок создает повышенные потери в струе. Это обнаруживается по высокому давлению

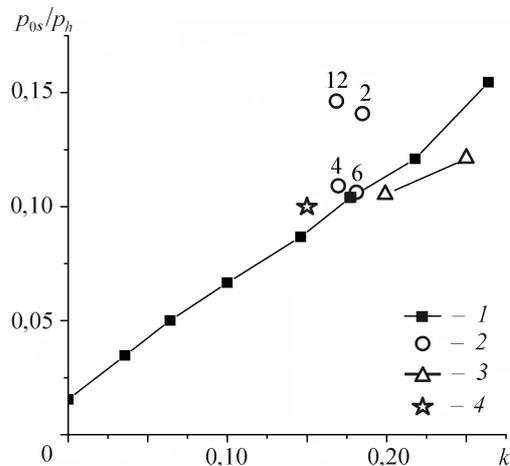


Рис. 7. Расходные характеристики.

1 — щелевой насадок, 2 — шевроны (2, 4, 6, 12 — их количество), 3 — табы, 4 — сопло без вихреобразователей, камера $L = 8,3D$.

рабочего газа, при котором происходит срыв критического режима. Так, в точке $p_{0s}/p_h = 0,12$ срыв происходит при давлении рабочего газа 42,5 бар. Расходная характеристика, характеризуемая произведением коэффициента эжекции на степень сжатия, имеет значения $k\varepsilon = (1,7-1,8)$.

Шевроны эффективны при больших нерасчетностях струи. Поэтому эксперименты с ними выполнялись при уменьшенных расходах низконапорного газа. Около каждого кружка, представляющего результат испытаний с шевронами, стоит цифра, указывающая на их количество (см. рис. 7). Лучший результат получен с шестью шевронами, значение $k\varepsilon = 1,7$. Нерасчетность струи в этом случае была $n = 1,75$. Шевроны не обеспечивают полного перемешивания в рассматриваемых эжекторах, вследствие этого давление срыва критического режима остается высоким — 39,5 бар.

Наиболее высокие расходные характеристики достигаются при использовании табов. Табы действуют при невысоких значениях нерасчетности. Так, при давлении низконапорного газа $p_{0s}/p_h = 0,12$ нерасчетность струи $n = 1,4$. Давление срыва критического режима снижается до 34,4 бар, значения $k\varepsilon$ увеличиваются до 2,1. Это значительно лучше значения $k\varepsilon = 1,5$, полученного ранее в эжекторе без устройств формирования вихрей [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментальном исследовании эжектора с сужающейся камерой показано, что интенсификация смешения с использованием устройств формирования продольных вихрей при соответствующем уменьшении длины камеры позволила уменьшить потери в эжекторе и улучшить расходные характеристики. В качестве устройств формирования вихрей использованы щелевые насадки, шевроны, табы. Наиболее высокая расходная характеристика получена при использовании сопла с табами.

Особенностью процесса запуска эжектора без расхода и с малым расходом низконапорного газа являются колебания, представляющие собой повторяющийся процесс перемещения псевдоскачка из горла эжектора в камеру и обратно. Колебания имеют место на докритических режимах со сверхзвуковым ядром потока в горле и завершаются одним из двух событий: установлением критического режима течения или запирианием горла эжектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М. Одноступенчатый эжектор большой степени сжатия // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 1. — С. 149–158.
2. Аркадов Ю.К. Газовый эжектор с соплом, перфорированным продольными щелями // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1968. — № 2. — С. 71–74.
3. Saiyed N.H., Mikkelsen K.L., Bridjes J.E. Acoustics and thrust of quiet separate-flow high-bypass-ratio nozzles // AIAA J. — 2003. — Vol. 41, No. 3. — P. 372–378.
4. Kim J.H., Samimy M. Mixing enhancement via nozzle trailing edge modifications in a high speed rectangular jet // Physics of fluids. — 1999. — Vol. 11, No. 9. — P. 2731–2742.
5. Foss J.K., Zaman K.B.M.Q. Large- and small-scale vortical motions in a shear layer perturbed by tabs // J. Fluid Mech. — 1999. — Vol. 382. — P. 307–329.
6. Ганич Г.А., Гущина Н.А., Жулев Ю.Г., Наливайко А.Г. Воздействие на струи продольными вихрями // Уч. зап. ЦАГИ. — 1993. — Т. XXIV, № 4. — С. 96–106.
7. Zaman K.B.M.Q. Spreading characteristics of compressible jets from nozzles of various geometries // J. Fluid Mech. — 1999. — Vol. 383. — P. 197–228.
8. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. Изд. 2-е. — М.: Энергия, 1970. — 288 с.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. — 824 с.

Статья поступила в редакцию 7 октября 2006 г.