

УДК 621.4/.6:533.6

## **Интенсификация смешения малоразмерными струями в эжекторах с центральным соплом**

**А.В. Соболев**

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

E-mail: sobolev@itam.nsc.ru

Выполнено экспериментальное исследование влияния интенсификации смешения малоразмерными струями на запуск и характеристики газового эжектора с центральным соплом и сужающейся камерой смешения. Показано, что при больших расходах низконапорного газа критический режим не устанавливается из-за формирования толстого дозвукового слоя у стенки камеры. В этих случаях осуществлялся ступенчатый запуск. Диапазон критических режимов ограничивается точкой перегрузки, в которой скорость у стенки камеры становится звуковой. Срыв критического режима за точкой перегрузки происходит вследствие распространения противодействия по дозвуковому слою вверх по потоку. Интенсификация смешения обеспечивает выравнивание профиля скорости и расширение диапазона критических режимов. Несмотря на улучшение характеристик, смешение в эжекторе с центральным соплом остается неполным. Экспериментальные характеристики сравниваются с расчетными. Процесс смешения является изобарическим в расчете без учета диссипативных потерь, из-за которых происходит повышение давления смеси рабочего и низконапорного газов.

**Ключевые слова:** сужающаяся камера, центральное сопло, интенсификация смешения, малоразмерные струи, критический режим, экспериментальные и расчетные характеристики.

Расчеты предсказывают уникальные характеристики газовых эжекторов с сужающимися камерами на критических режимах. В эжекторах с обычным центральным соплом такие характеристики получить не удастся, за исключением режимов с небольшими коэффициентами эжекции. В работе [1] применена интенсификация смешения табами — малогабаритными вихреобразователями, установленными на кромке сопла. Расчетные характеристики получены при коэффициентах эжекции меньше 0,25. С увеличением коэффициента эжекции табы становятся недостаточно эффективными. Смешение ухудшается, критический режим не поддерживается. Возникает потребность в более эффективных интенсификаторах, в качестве которых рассматриваются малоразмерные струи.

Эксперименты выполнялись на установке, схема которой представлена в работе [2]. Расход рабочего газа регулировался вентилем и рассчитывался по критическому сечению сопла, температуре и давлению в предсопловом объеме. Низконапорный газ забирался из окружающего пространства через мерное сопло, из которого происходило струйное истечение в камеру низкого давления. Сечение камеры на порядок превышает входное сечение эжектора, поэтому давление в камере принято равным полному давлению низконапорного газа. Расход низконапорного газа рассчитывался по давлению и температуре в окружающем пространстве, по давлению в цилиндрическом участке мерного сопла

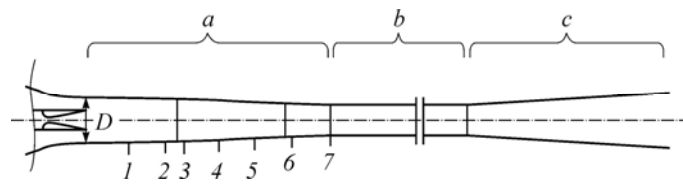


Рис. 1. Контур эжектора.

$a$  — камера смешения,  $b$  — горло (сверхзвуковой диффузор),  $c$  — дозвуковой диффузор, 1–7 — точки замера давления.

и его площади. Расчеты велись с учетом коэффициентов расходов, типичные значения которых составляют для рабочего сопла 0,98 и для мерных сопел 0,94–0,95.

За основу взят эжектор, рассматриваемый в работе [1]. Длина камеры смешения увеличена до  $\bar{L} = 4,9$  за счет увеличения длины входного цилиндрического участка (рис. 1). Камера включает цилиндрический участок диаметром 53 мм, первый конический участок с углом конуса  $7^\circ$  и второй конический участок с углом  $4^\circ$ . Относительное сечение горла эжектора  $\bar{A}_3 = 0,45$ . Рабочее сопло с числом Маха  $M = 4,5$  и диаметром выходного сечения 20 мм рассчитано на давление рабочего газа 35–40 бар. Малоразмерные струи подавались через четыре сопла с диаметром критического сечения 2 мм и  $M = 3$ . Малоразмерные сопла наклонены на угол  $25^\circ$  к оси основного сопла (рис. 2). При номинальном расходе импульс воздействия малоразмерной струи на боковую поверхность основной струи в несколько раз превосходит воздействие таба.

Влияние смешения на свойства эжектора видно из расчетной схемы. Сечение полного перемешивания при интенсивном смешении смещается вперед, его площадь увеличивается. Статическое давление в сечении полного перемешивания и перед ним снижается, это вызывает увеличение скорости низконапорного газа во входном сечении эжектора. Типичные значения скорости низконапорного газа без интенсификации смешения  $\lambda_s = 0,3–0,4$ , с интенсивным смешением изобарические скорости возрастают до  $\lambda_s = 0,6$ . Полное давление низконапорного газа уменьшается пропорционально  $1/q(\lambda_s)$ , где  $q(\lambda_s)$  — газодинамическая функция расхода. С ростом скорости низконапорного газа снижаются потери на удар, характеристика эжектора улучшается. Далее будет показано, что при интенсивном смешении расширяется рабочий участок характеристики эжектора.

Режимы течения и запуск наглядно видны на графике зависимости полного давления низконапорного газа от давления рабочего газа. На рис. 3 представлен график для режима



с максимальным коэффициентом эжекции, с которым эжектор запускается,  $k = 0,19$ . Используются обозначения:  $p_{0p}$  — полное давление рабочего газа,  $p_{0s}$  — полное давление низконапорного газа,  $p_h$  — давление окружающей среды,  $p_7$  — давление на стенке в конце камеры смешения. Длина сверхзвукового ядра на докритическом режиме больше длины камеры смешения. С ростом давления рабочего газа происходит монотонное снижение полного давления низконапорного газа вдоль линии

Рис. 2. Сопловой блок.

Рис. 3. Газодинамические режимы ( $k = 0,19$ ). 1 — докритический режим, 2 — критический режим; A — установление, B — разрушение критического режима.

докритических режимов 1. Давление в камере в точке A при хорошем смешении и длинном сверхзвуковом диффузоре незначительно превышает давление на критическом режиме, дозвуковой слой у стенки камеры смешения в этом случае тонкий, устанавливается критический режим. При плохом смешении или недостаточной длине сверхзвукового диффузора дозвуковой слой толстый, критический режим не устанавливается. Возможны промежуточные варианты (см. рис. 3). При запуске давление низконапорного газа падает до величины на линии критических режимов 2. На критическом режиме по всей ширине выходного сечения камеры реализуется сверхзвуковое течение с сопровождающим его псевдоскачком.

На докритическом режиме толщина дозвукового слоя и давление в камере при интенсивном смешении растут, поэтому запуск осуществлялся без интенсификации смешения. После запуска подавался расход малоразмерных струй, происходило выравнивание профиля скорости на критическом режиме. Критические режимы с большими коэффициентами эжекции устанавливались со ступенчатой подачей низконапорного газа. Для этого расход низконапорного газа увеличивался после установления критического режима и подачи расхода малоразмерных струй. При снижении давления рабочего газа псевдоскачок фиксируется на передней кромке горла, возникает дефицит импульса и происходит разрушение критического режима (точка B на рис. 3).

На рис. 4 представлены характеристики эжектора 1. Здесь же показаны характеристики предшествующего варианта 2 этого эжектора с табами [1]. В эжекторе с интенсификацией смешения малоразмерными струями критические режимы поддерживаются при коэффициентах эжекции до 0,37, это точка перегрузки. Расход малоразмерных струй составляет в точке перегрузки 2,5 % от расхода основной струи. Расширение рабочей характеристики в область больших расходов низконапорного газа означает улучшение свойств эжектора. Для откачки больших объемов низконапорного газа без расширения рабочей характеристики требуется эжектор с увеличенным сечением горла. В таком эжекторе неизбежно возрастет расход рабочего газа, ухудшится его экономичность.

В таблице приведены данные, позволяющие сравнить экспериментальные характеристики эжектора с расчетными. Расчет выполнен по методике [3] для заданной конфигурации эжектора, расхода и полного давления низконапорного газа. В таблице представлены расчетные значения коэффициента эжекции  $k$ , приведенной скорости  $\lambda_d$  и статического давления  $p$  (в барах) в выходном сечении камеры с учетом потерь. Сравнение экспериментальных и расчетных характеристик выполняется по величине произведения степени сжатия  $\varepsilon$  на коэффициент эжекции  $k$ . Кроме того, приводится отношение измеренного давления на стенке в конце камеры  $p_7$  к расчетному давлению  $p$ .

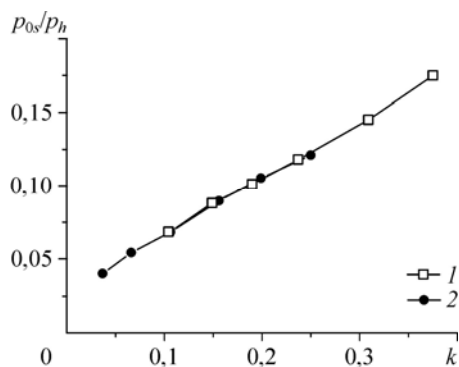
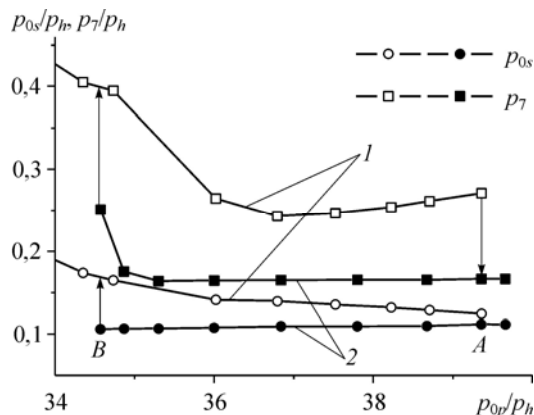


Рис. 4. Характеристики эжектора. 1 — малоразмерные струи, 2 — табы.



Таблица

Сравнение расчетных и измеренных характеристик эжектора

Расчет, $\nu = 0,85$					Эксперимент	
$P_{0s}$	$k$	$\varepsilon k$	$\lambda_d$	$p$	$\varepsilon k$	$p_7/p$
0,068	0,101	1,49	1,93	0,10	1,55	1,1
0,088	0,148	1,68	1,84	0,12	1,70	1,11
0,101	0,187	1,84	1,75	0,15	1,89	1,18
0,118	0,236	2,0	1,68	0,17	2,02	1,27
0,145	0,3	2,07	1,52	0,24	2,10	1,27
0,176	0,37	2,12	1,38	0,31	2,11	1,36

Расчет выполнен с учетом потерь полного давления в камере смешения. Если  $P$  и  $\lambda$  — полное давление и приведенная скорость в идеальном течении,  $P_d$  и  $\lambda_d$  — соответствующие величины с учетом потерь,  $P_d = \nu P$ , то условие постоянства расхода в произвольном сечении камеры:

$$Pq(\lambda) = P_d q(\lambda_d).$$

В сверхзвуковом течении диссипативные потери порождают снижение скорости и повышение статического давления. Расчетные характеристики эжектора совпали с измеренными при  $\nu = 0,85$ .

Расчетное статическое давление в выходном сечении камеры в точке перегрузки повышено из-за диссипативных потерь в 1,22 раза. Измеренное давление превышает расчетное еще в 1,36 раза. Дополнительное повышение давления связано с неравномерностью течения. Происходит сжатие и торможение частично перемешанного сверхзвукового потока при движении в сужающейся камере. Средняя приведенная скорость действительного течения определяется из условия равенства расходов

$$1,36 y(\bar{\lambda}) = y(\lambda_d),$$

откуда  $\bar{\lambda} = 1,16$  при  $\lambda_d = 1,38$ . Средняя скорость в выходном сечении камеры в точке перегрузки снижается до малой сверхзвуковой. Скорость у стенок становится звуковой, противодавление передается ко входу камеры по дозвуковому слою при снижении расхода рабочего газа. За точкой перегрузки срыв критического режима происходит при повышенном расходе рабочего газа. Из-за неполного смешения не удалось реализовать критические режимы с величиной расчетной приведенной скорости на выходе камеры  $\lambda_d < 1,38$  (происходит ограничение рабочей характеристики эжектора).

Рассматриваемый эжектор обладает хорошей всасывающей способностью. В сечении запиранья устанавливаются критические скорости низконапорного газа на режимах с коэффициентами эжекции выше 0,2. В монографии [4, рис. 3.22] представлен пример, в котором критические условия в сечении запиранья (второй предельный режим) сохраняются при переходе к докритическому течению смеси газов за этим сечением. Результат качественно отличается от полученного нами и является следствием использования короткого сверхзвукового диффузора. Псевдоскачок в таком эжекторе выходит из камеры при повышенном импульсе. При увеличении противодавления профицит импульса уменьшается и критический режим сохраняется несмотря на то, что псевдоскачок входит в конический участок камеры. Головной скачок находится в коническом участке при балансе импульсов во входном и выходном сечениях эжектора. В эжекторе с полноразмерным диффузором псевдоскачок располагается в диффузоре, возникновение дефицита импульса ведет к срыву критического режима.

Интенсификация смешения малоразмерными струями в эжекторах с центральным соплом позволила расширить диапазон критических режимов. Однако смешение в них остается неполным. Из-за неполного смешения затруднен запуск, повышено давление

в камере, рабочая характеристика ограничена точкой перегрузки. Предельный режим  $\lambda_d = 1$  не достигается. Разрушение критического режима за точкой перегрузки вызвано распространением противодавления ко входу по дозвуковому слою вдоль стенки камеры смещения.

#### **Список литературы**

1. **Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М.** Применение насадок шевронов и табов для улучшения расходных характеристик газовых эжекторов // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 2. С. 201–208.
2. **Соболев А.В., Запрягаев В.И., Мальков В.М.** Одноступенчатый эжектор большой степени сжатия // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 1. С. 149–158.
3. **Соболев А.В.** Расчет критических режимов эжекторов с сужающимися камерами // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 2. С. 245–255.
4. **Соколов Е.Я., Зингер Н.М.** Струйные аппараты. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1970. 288 с.

*Статья поступила в редакцию 8 ноября 2011 г.,  
после переработки 13 февраля 2013 г.*