



ЦЕГЕЛЬСКИЙ
Валерий Григорьевич
доктор технических наук,
главный научный
сотрудник НИИ ЭМ



АКИМОВ
Михаил Витальевич
научный сотрудник
НИИ ЭМ



САФАРГАЛИЕВ
Тимур Дамирович
инженер НИИ ЭМ
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Экспериментально-теоретическое исследование режимов работы сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения

В.Г. Цегельский, М.В. Акимов, Т.Д. Сафаргалиев

Экспериментальным и расчетным путем опровергнута гипотеза, которая использовалась в течение длительного времени рядом авторов в теории сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической камерой смешения. Впервые экспериментально показана возможность реализации при одном и том же коэффициенте эжекции двух различных критических режимов работы в газовых эжекторах с конической камерой смешения. Получено удовлетворительное согласование результатов эксперимента с расчетом, приведенным в работе [1].

Ключевые слова: газовый эжектор, критический режим, коническая камера смешения, дроссельная характеристика, уравнения эжекции.

The hypothesis used by a number of authors for a long time in the theory of supersonic gas ejectors with cylindrical mixing chambers has been disproved by means of experiments and calculations. The possibility of existence of two various critical operating modes is shown experimentally for the first time for gas ejectors with a conical mixing chamber at the same ejection coefficient. Satisfactory agreement of experimental results and calculations is obtained.

Keywords: gas ejectors, critical operating mode, conical mixing chamber, throttle performance, ejection equations.

В работе [1] проведен анализ возможных режимов работы газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения (КС) и на основании теорем термодинамики необратимых процессов получены необходимые условия для их реализации. Показано, что в сверхзвуковом газовом эжекторе с конической КС кроме докритических, могут быть реализованы первый и второй критические режимы работы. При этом реализовавшийся при определенных условиях первый критический режим может скачкообразно перейти во второй критический режим.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают теоретические выводы, полученные в работе [1], и показывают возможность реализации в сверхзвуковом эжекторе с конической КС более эффективного процесса эжектирования пассивного газа.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, принципиальная схема которого приведена в работе [2]. В сверхзвуковом сопло

активного газа подавался воздух из рампы высокого давления. Постоянное давление активного газа на входе в сверхзвуковое сопло поддерживалось с помощью редуцирующего клапана. Расход пассивного газа в приемную камеру эжектора также поступал из воздушной рампы высокого давления через мерное сверхзвуковое сопло, причем в течение всего эксперимента на нем обеспечивался сверхкритический перепад давления. В связи с этим, при изменении давления смеси газов на выходе из эжектора P_{c3} с помощью дистанционно управляемого дросселя, оставался постоянным коэффициент эжекции K , равный отношению массовых расходов пассивного и активного газов.

В процессе проведения эксперимента получали дроссельную характеристику эжектора, которая представляет собой зависимость полного давления пассивного газа $P_{п0}^*$ на входе в эжектор известной геометрии от полного давления смеси газов P_{c3}^* на выходе из него. Данная характеристика строилась для фиксированного коэффициента эжекции K при следующих постоянных входных параметрах: P_{a0}^* — полное давление активного газа на входе в эжектор; $T_a^*, T_{п}^*$ — температура торможения соответственно активного и пассивного газов на входе в эжектор; состав активного и пассивного газов. При этом полное давление смеси газов P_{c3}^* на выходе из эжектора принималось равным статическому давлению P_{c3} ввиду малой скорости смеси в выходном сечении диффузора. В силу малой скорости пассивного газа в приемной камере эжектора (перед сужающимся соплом) также принималось $P_{п0}^* = P_{п0}$. При проведении эксперимента замерялось распределение статического давления по длине проточной части эжектора в некоторых точках дроссельной характеристики. Кроме того, для каждой геометрии эжектора строилась зависимость $P_{п0}^* = f(K)$ при $P_{c3} \approx \text{const}$. При построении такой зависимости расход активного газа оставался постоянным, а коэффициент эжекции изменялся за счет изменения расхода пассивного газа путем увеличения или уменьшения давления перед мерным сверхзвуковым соплом.

На рисунке 1, а приведена экспериментальная дроссельная характеристика эжектора с цилиндрической КС и сверхзвуковым соплом, полученная при постоянном в эксперименте коэффициенте эжекции $K_э = 0,079$. На рисунке 1, б представлено распределение давления, замеренного на стенке аппарата по длине КС и диффузора, для эжектора с приведенной на рисунке геометрией. Номера кривых на рис. 1, б соответствуют номерам точек на дроссельной характеристике эжектора (рис. 1, а), в которых замерялось распределение давления. Под рисунком 1 указаны режимные ($P_{a0}^*, T_a^*, T_{п}^*$) и безразмерные геометрические параметры эжектора: $\alpha = F_{п1} / F_{a1}$ — отношение площади выходного сечения сопла пассивного газа $F_{п1}$ к площади выходного сечения сопла активного газа F_{a1} ; $\beta = F_2 / F_1$ — отношение площади F_2 выходного сечения 2–2 камеры смешения эжектора к площади F_1 входного сечения 1–1; $\bar{l}_{кС} = l_{кС} / d_2$ — отношение длины $l_{кС}$ камеры смешения к диаметру d_2 ее выходного сечения;

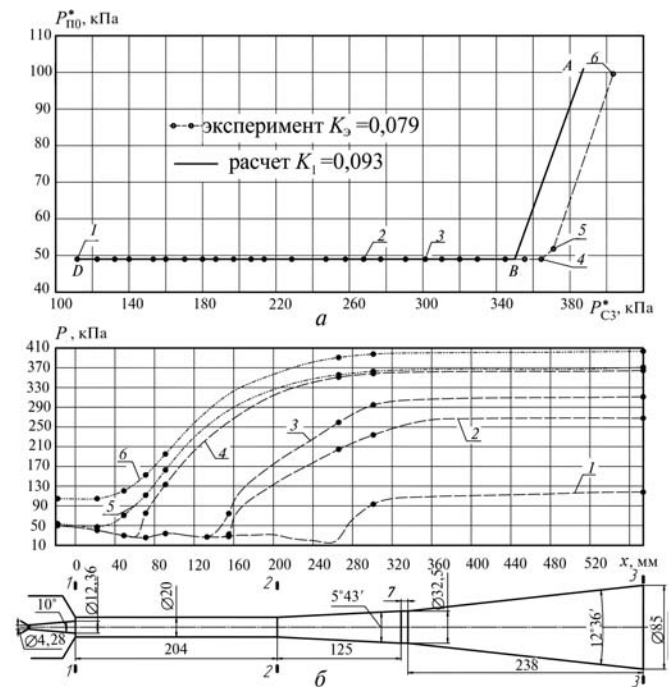


Рис. 1. Сравнение расчетной (линии, $K_1 = 0,093$) и экспериментальной (точки, $K_э = 0,079$) дроссельных характеристик (а) и распределение давления на стенке по длине проточной части (б) эжектора с цилиндрической КС и сверхзвуковым соплом ($\alpha = 1,617$; $\beta = 1$; $f_a = 0,12$; $\bar{l}_{кС} = 10,2$; $P_{a0}^* = 5, 13$ МПа; $T_a^* = T_{п}^* = 275$ К)

$f_a = F_{кр} / F_{a1}$ — степень расширения сверхзвукового сопла, где $F_{кр}$ — площадь критического сечения сверхзвукового сопла.

Здесь и далее параметры активного газа будем отмечать в индексе буквой «а», параметры пассивного газа — буквой «п», параметры смеси газов — буквой «с», цифрой — сечение эжектора, к которому относится параметр. Все обозначения в этой работе полностью соответствуют обозначениям, принятым в работе [1].

На рисунке 2 приведены зависимости удельных производств энтропии $\Pi S'$, $\Pi S''$ и их составных частей $\Pi S'_v$, $\Pi S''_v$ от коэффициента эжекции K , рассчитанные в соответствии с [1], для эжектора с термодинамическими и геометрическими параметрами, указанными на рис. 1, при $P_{п0}^* = 0,049$ МПа. Величины с индексом «'» соответствуют сверхзвуковому режиму течения смеси газов в выходном сечении КС (большому корню уравнения эжекции (18) в [1]), а с индексом «''» — дозвуковому режиму (меньшему корню уравнения эжекции).

При проведении расчетов, представленных в данной статье, коэффициент потерь полного давления ν_a в коническом сверхзвуковом сопле активного газа определялся по зависимостям, приведенным в работе [4]; коэффициент скорости сужающегося сопла пассивного газа принимался равным $\varphi_{п} = 0,98$; считалось, что в вы-

ходном сечении камеры смешения 2–2 образовалась однородная механически и термодинамически равновесная газовая смесь (т. е. $\Pi_{с2} = 1$; $\Pi_{кин,с2} = 1$); потери полного давления в диффузоре на начальном критическом и докритических режимах определялись по [1]. Кроме того, проведенные оценочные расчеты показали слабое влияние на характеристики эжектора силы трения газа о стенку КС в силу малой ее длины. На основании чего в представленных расчетах силой трения газа о стенку КС пренебрегли.

На рисунке 2 нанесен расчетный коэффициент эжекции $K_1 = 0,093$, определенный для первого критического режима работы эжектора, при котором происходит запираание проточной части начального участка КС вследствие возрастания скорости струи пассивного газа до скорости звука (см. [1]). Также на рисунке 2 нанесено значение экспериментального коэффициента эжекции $K_э$ для критического режима работы.

На рисунке 1, а сплошной линией показана расчетная дроссельная характеристика эжектора, построенная на основании [1], для постоянного коэффициента эжекции $K_1 = 0,093$. Дроссельная характеристика состоит из участка критических режимов работы $B - D$ и участка докритических режимов $B - A$. На докритических режимах с уменьшением противодавления $P_{с3}^*$ при $K = \text{const}$ уменьшается полное давление пассивного газа $P_{п0}^*$ на входе в эжектор. При этом изменяется и распределение статического давления по всей длине проточной части эжектора (см. кривые 4–6 на рис. 1, б). Наконец, при противодавлении, соответствующем точке 4 на экспериментальной дроссельной характеристике, дальнейшее снижение $P_{с3}^*$ не приводит к уменьшению давления пассивного газа на входе в эжектор, которое остается постоянным и равным $P_{п0}^* = 0,049$ МПа для экспериментального коэффициента эжекции $K_э = 0,079$. На рисунке 1, б видно, что на начальном критическом режиме, соответствующем точке 4 экспериментальной дроссельной характеристики, происходит падение статического давления на начальном участке камеры смешения с 0,049

ΠS , кДж/(кг·К)

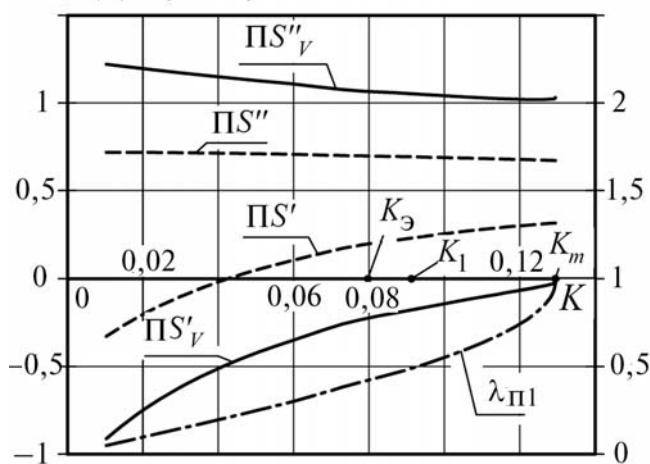


Рис. 2. Результаты расчета газового эжектора с цилиндрической камерой смешения и сверхзвуковым соплом ($\alpha = 1,617$; $\beta = 1$; $f_a = 0,12$; $P_{a0}^* = 5,13$ МПа; $P_{п0}^* = 0,049$ МПа; $T_a^* = T_{п}^* = 275$ К)

до ~0,03 МПа, а затем следует резкое повышение давления в скачке уплотнения. Таким образом, при $P_{п0}^* = 0,049$ МПа реализуется первый критический режим работы эжектора, при котором происходит запираение проточной части начального участка КС вследствие возрастания скорости струи пассивного газа до скорости звука, вызванного уменьшением площади ее поперечного сечения за счет расширения сверхзвуковой струи активного газа. При дальнейшем уменьшении противодавления $P_{с3}^*$ скачок уплотнения перемещается по КС к входному сечению диффузора и далее входит в диффузор (кривые 4–1 на рис.1, б). При этом распределение статического давления и, соответственно, картина течения на начальном участке КС не изменяются. Таким образом, в точке 4 экспериментальной дроссельной характеристики, соответствующей начальному критическому режиму, в выходном сечении КС течет дозвуковой поток смеси, что подтверждает теоретические выводы, сделанные в работе [1].

На рисунке 2 также видно, что при экспериментальном значении коэффициента эжекции $K_э = 0,079$ в выходном сечении КС может реализоваться только дозвуковой режим течения смеси газов, так как только для этого режима удельное производство энтропии PS'' и ее составляющая часть PS''_v , связанная с выравниванием скоростей активного и пассивного газов в процессе смешения, имеют положительные значения (см. [1]). Поэтому при расчете рассматриваемого эжектора на начальном критическом режиме следует принимать в выходном сечении КС параметры течения смеси, соответствующие меньшему корню уравнения эжекции (18) в [1]. Аналогичные экспериментальные результаты были получены и при других термодинамических и геометрических параметрах эжекторов с цилиндрической КС. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования не подтверждают высказанную в статье [3] гипотезу, согласно которой в эжекторе со сверхзвуковым соплом при реализации на входном участке цилиндрической КС картины течения смешиваемых газов, соответствующей первому критическому режиму, в выходном се-

чении КС скорость смеси газов становится сверхзвуковой.

На рисунке 3, а приведена экспериментальная дроссельная характеристика эжектора со сверхзвуковым соплом и конической КС, полученная при коэффициенте эжекции $K_э = 0,238$. На рисунке 3, б представлено распределение давления, замеренного на стенке аппарата по длине КС и диффузора, для эжектора с приведенной на рисунке геометрией. Номера кривых распределения давления на рис. 3, б соответствуют номерам точек на дроссельной характеристике (см. рис. 3, а), в которых замерялось распределение давления. В работе [1] отмечена возможность влияния порядка запуска эжектора с конической КС на его характеристики. Поэтому при построении приведенных в статье экспериментальных дроссельных характеристик сначала в эжектор подавался активный газ при противодавлении не выше 0,11 МПа, затем — пассивный. Изменение порядка запуска эжектора — подача сначала пассивного газа, а затем ак-

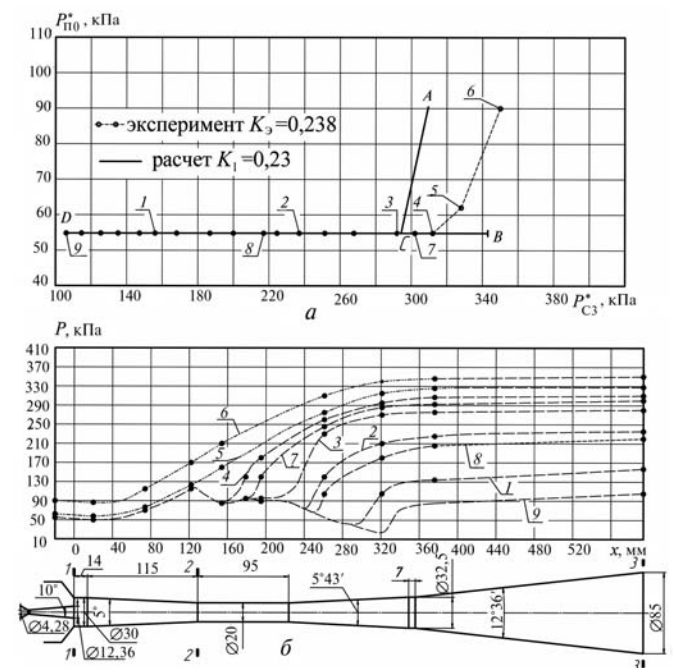


Рис. 3. Сравнение расчетной (линии, $K_1 = 0,23$) и экспериментальной (точки, $K_э = 0,238$) дроссельных характеристик (а) и распределение давления на стенке по длине проточной части (б) эжектора с конической КС и сверхзвуковым соплом ($\alpha = 4,89$; $\beta = 0,444$; $f_a = 0,12$; $l_{КС} = 6,45$; $P_{a0}^* = 5,13$ МПа; $T_a^* = T_{п}^* = 275$ К)

тивного, на приведенную на рис. 3, *a* характеристику не оказало влияния.

Видно, что рассматриваемая экспериментальная дроссельная характеристика (см. рис. 3) при $K_3 = 0,238$ состоит из критического режима (точки 1–4; 7–9), на котором с изменением противодавления P_{c3}^* полное давление пассивного газа $P_{п0}^* = 0,0548$ МПа остается постоянным, и докритического режима (точки 5–6), при котором с изменением противодавления меняется $P_{п0}^*$. При этом давление пассивного газа, соответствующее критическому режиму, оставалось одним и тем же, как в случае перехода при увеличении противодавления критического режима (точки 1–4) в докритический, так и при переходе с уменьшением противодавления P_{c3}^* докритического режима в критический (точки 7–9). На критическом режиме с увеличением противодавления скачок давления перемещается по диффузору и его горловине к выходному сечению 2–2 камеры смешения (см. кривые 1–4 на рис. 3, *б*). При этом распределение давления по длине конической КС не изменяется. Как только скачок давления доходит до выходного сечения 2–2 конической КС (кривая 4) и входит в нее (кривая 5), начинает изменяться распределение давления по длине КС и увеличиваться $P_{п0}^*$ (кривые 5, 6). На основании сказанного можно предположить, что в выходном сечении конической КС реализуются критические параметры течения смеси, соответствующие второму критическому режиму (см. [1]).

На рисунке 4, *a* представлены зависимости удельных производств энтропии PS' , PS'' и их составных частей PS'_v , PS''_v , а также приведенной скорости пассивного потока $\lambda_{п1}$ на входе в КС от коэффициента эжекции K , рассчитанные по [1] для экспериментального эжектора с указанными на рис. 3 параметрами при $P_{п0}^* = 0,0548$ МПа. На рисунке 4, *б* приведены расчетные зависимости статических P_{c2} и полных P_{c2}^* давлений смеси газов в выходном сечении КС, соответствующих меньшему («''») и большему («'») корням уравнения эжекции (18) (см. [1]), а также зависимости статического

давления $P_{п1}$ пассивного потока на входе в КС и полного давления $P_{ск}^*$ изоэнтропического торможения смеси газов за скачком уплотнения, расположенным в выходном сечении КС, от коэффициента эжекции K . Эти зависимости рассчитывали в процессе решения уравнений эжекции, приведенных в работе [1], одновременно с зависимостями, показанными на рис. 4, *a*. При расчете использовался параметр $z = 0,41$, определенный из экспериментального распределения статического давления на стенке по длине конического участка КС для критического режима работы эжектора. На рисунке 4, *a, б* представлен расчетный коэффициент эжекции $K_2 = 0,23$, при котором реализуется второй критический режим работы эжектора, приводящий к запираанию выходного сечения КС вследствие возникновения в нем сверхзвукового режима течения смеси. Также на рис. 4, *a, б* представлен экспериментальный коэффициент эжекции K_3 , при котором реализовался критический режим работы. Удовлетворительное согласование экспериментального коэффициента K_3 со значением K_2 , определенным по [1], показывает, что при смешении газов с одинаковыми составами и температурами торможения в эжекторе с конической КС и расчетным сверхзвуковым соплом, величина K_2 может быть найдена из условия равенства расчетных значений статического давления P'_{c2} на выходе КС и статического давления $P_{п1}$ пассивного потока на входе в нее (см. рис. 4, *б*). В приведенном на рис. 3 эксперименте истечение активного газа из сопла было близко к расчетному с учетом толщины пограничного слоя, уменьшающей степень расширения газа.

На рисунке 4, *б* показан участок *BD* дроссельной характеристики эжектора, соответствующий критическому режиму работы, а на рис. 3, *a* сплошной линией нанесена расчетная дроссельная характеристика эжектора при коэффициенте эжекции $K_2 = 0,23$, построенная с использованием [1]. На расчетной характеристике участок *BD* соответствует критическому режиму, а участок *AC* — докритическому режиму работы эжектора с постоянным коэффициентом эжекции. При расчете докритического режима было принято значение параметра

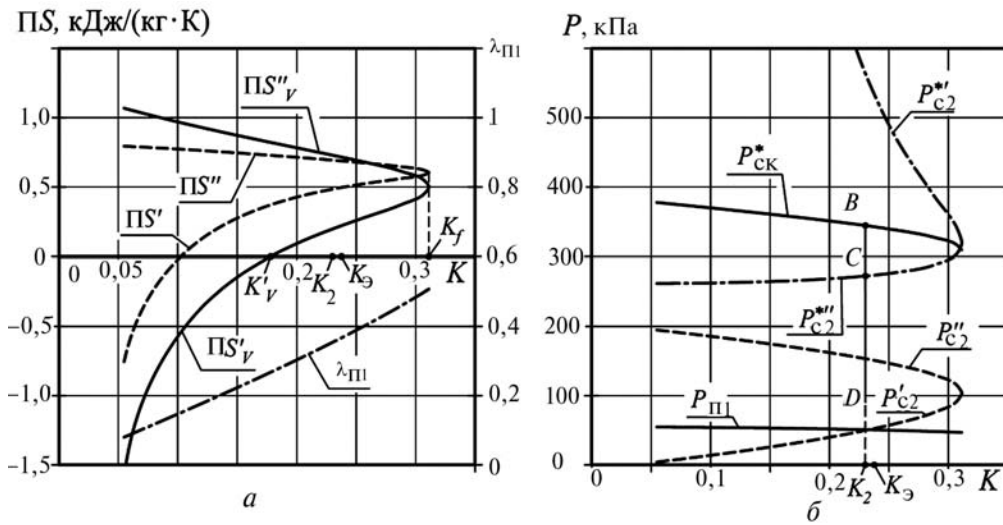


Рис. 4. Результаты расчета газового эжектора с конической камерой смешения ($\alpha = 4,89$; $\beta = 0,444$; $f_a = 0,12$; $\bar{l}_{KC} = 6,45$; $P_{a0}^* = 5,13$ МПа; $P_{n0}^* = 0,0548$ МПа; $z = 0,41$; $T_a^* = T_n^* = 275$ К)

$z = 0,25$, определенное из экспериментального распределения давления на стенке по длине конического участка КС при работе эжектора на докритическом режиме в точке *б* дроссельной характеристики. Аналогичные экспериментальные результаты были получены при исследовании эжектора данной геометрии с коэффициентом эжекции $K > 0,238$ (см., например, рис. 5).

Принципиально иные результаты получены при исследовании рассматриваемого эжектора с коэффициентом эжекции $K < 0,238$. На рисунке *б, а* приведена экспериментальная дроссельная характеристика эжектора с конической КС при коэффициенте эжекции $K_3 = 0,215$, а на рис. *б, б* — распределение статического давления, замеренного на стенке в указанных точках проточной части эжектора с приведенной на рисунке геометрией. Номера кривых распределения давления на рис. *б, б* соответствуют номерам точек на дроссельной характеристике рис. *б, а*. При запуске эжектора сначала подавался активный газ при противодавлении не выше 0,11 МПа, а затем постепенно увеличивался расход пассивного газа до получения коэффициента эжекции $K_3 = 0,215$, после чего изменялось противодавление P_{c3}^* . На рисунке *б, а* видно, что экспериментальная дроссельная характеристика состоит из двух критических и докритического режимов. На критическом режиме, установившемся после запуска эжек-

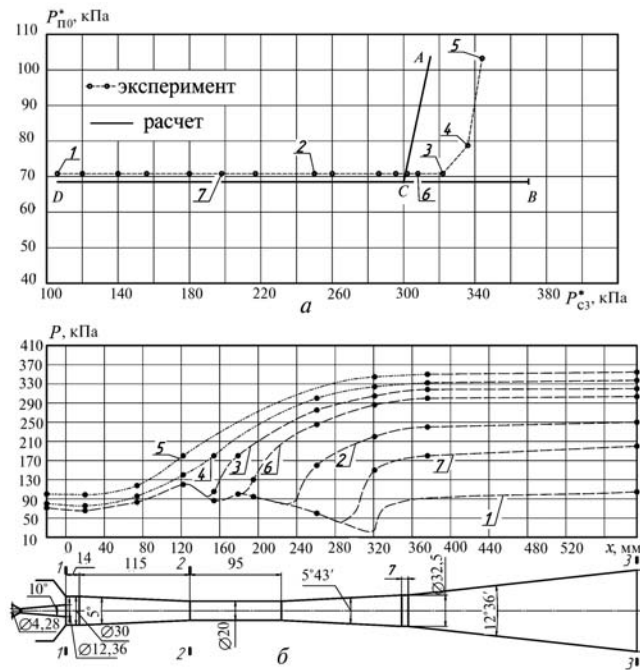


Рис. 5. Сравнение расчетной (линии) и экспериментальной (точки) дроссельных характеристик при $K = 0,282$ (*а*) и распределение давления на стенке по длине проточной части (*б*) эжектора с конической КС и сверхзвуковым соплом ($\alpha = 4,89$; $\beta = 0,444$; $f_a = 0,12$; $\bar{l}_{KC} = 6,45$; $P_{a0}^* = 5,15$ МПа; $T_a^* = T_n^* = 275$ К)

тора (точки 1–4 на рис. *б, а*), с увеличением противодавления P_{c3}^* скачок давления перемещается по диффузору к выходному сечению 2–2 КС (кривые 1–3 на рис. *б, б*). При этом распределение давления по длине конической

КС не изменяется и наблюдается существенное падение статического давления на начальном участке КС с последующим его ростом к выходному сечению 2–2 КС. Это указывает на то, что в выходном сечении КС газовая смесь имеет сверхзвуковую скорость. При дальнейшем увеличении противодавления P_{c3}^* скачок уплотнения входит в камеру смешения (кривые 4 на рис. 6, б), однако, при этом $P_{п0}^*$ не изменяется (точка 4 на рис. 6, а), так же как и распределение давления на начальном участке КС. Это может быть только в том случае, если на начальном участке КС реализовалась структура течения смешивающихся газов, соответствующая первому критическому режиму. Это подтверждается и распределением давления на начальном участке цилиндрической КС при работе эжектора на первом критическом режиме (см. рис. 1, б), аналогичным распределению давления на начальном участке конической КС (точки 1–4 на рис. 6, б). На основании этого можно утверждать, что реализовавшийся после запуска эжектора критический режим (точки 1–4 на рис. 6, а) является первым критическим режимом. При дальнейшем увеличении противодавления P_{c3}^* этот режим срывается, что сопровождается резким увеличением давления пассивного газа на входе в эжектор $P_{п0}^*$ (кривая 5 на рис. 6, б и точка 5 на рис. 6, а). Эжектор переходит с первого критического на докритический режим работы. При дальнейшем уменьшении противодавления докритический режим переходит во второй критический режим работы эжектора (точки 6–7 на рис. 6, а), при котором постоянное давление пассивного газа на входе в эжектор $P_{п0}^*$ и постоянное распределение давления на стенке по длине КС (рис. 6, б) при изменении противодавления обеспечивается реализацией критических параметров течения смеси (в данном случае сверхзвуковой скорости смеси) в выходном сечении КС. Распределения давления на стенке по длине КС для возникающего в этом случае второго критического режима (кривые 6–7 на рис. 6, б) аналогичны распределениям, представленным на рис. 3, 5 для такого же критического режима. При запуске рассматриваемого эжектора

с подачей сначала пассивного газа расходом, необходимым для получения $K_3 = 0,215$, а затем активного газа, получаем экспериментальную дроссельную характеристику, состоящую только из участков, соответствующих второму критическому и докритическому режимам, первый критический режим в этом случае не реализуется.

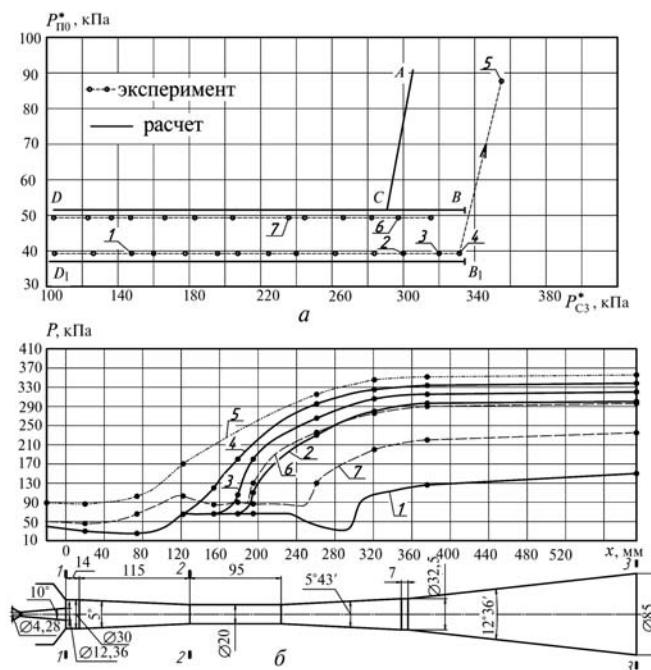


Рис. 6. Сравнение расчетной (линии) и экспериментальной (точки) дроссельных характеристик при $K = 0,215$ (а) и распределение давления на стенке по длине проточной части (б) эжектора с конической КС и сверхзвуковым соплом ($\alpha = 4,89$; $\beta = 0,444$; $f_a = 0,12$; $l_{КС} = 6,45$; $P_{a0}^* = 5,15$ МПа; $T_a^* = T_{п0}^* = 275$ К)

Для определения зависимости полного давления пассивного газа $P_{п0}^*$ от коэффициента эжекции K на критических режимах работы эжектора и диапазона коэффициентов эжекции, в котором возможно получение дроссельных характеристик, аналогичных приведенным на рис. 6, снимались экспериментальные характеристики $P_{п0}^* = f(K)$ при противодавлении за эжектором P_{c3}^* намного меньшем противодавления на начальном критическом режиме (точка 4 на рис. 6). На рисунке 7 представлена такая характеристика для эжектора с геометрическими параметрами, приведенными на рис. 6, б. При получении

этой характеристики в эжектор сначала подавался полный расход активного газа, а затем подавался пассивный газ со ступенчатым увеличением его расхода до некоторого максимального значения коэффициента эжекции, после чего расход пассивного газа ступенчато уменьшался до нуля. При построении данной характеристики противодавление на выходе из эжектора составляло $P_{c3}^* = 0,102...0,11$ МПа. Одновременно в стационарных точках снималось распределение давления на стенке по длине проточной части эжектора. На рисунке 7 экспериментальная характеристика представлена точками, в которых проводилось измерение распределения давления на стенке по длине проточной части эжектора.

Экспериментальная характеристика, получаемая проведением линии через экспериментальные точки, состоит из двух кривых, которые сливаются при малых коэффициентах эжекции. Нижнюю кривую, полученную при увеличении коэффициента эжекции до некоторого значения, отмеченного вертикальной стрелкой над экспериментальной точкой, при превышении которого резко увеличивается давление $P_{п0}^*$ и происходит

переход на верхнюю кривую. Дальнейшее увеличение коэффициента эжекции приводит к росту $P_{п0}^*$ в соответствии с верхней кривой. При последующем уменьшении коэффициента эжекции полное давление газа $P_{п0}^*$ изменяется в соответствии с верхней кривой, помеченной стрелкой в сторону уменьшения K , до тех пор, пока она не сольется с нижней экспериментальной кривой при $K \approx 0,13$.

По распределению давления на стенке по длине КС было выявлено, что верхняя кривая соответствует вторым критическим режимам, а нижняя кривая и участок слияния двух кривых соответствует первым критическим режимам. Это подтверждают и нанесенные на рис. 7 экспериментальные результаты (■), полученные в процессе построения экспериментальных дроссельных характеристик при $K = \text{const}$, часть из которых приведена на рис. 3, 5, 6.

Нанесем на рис. 7 результаты расчета, выполненные по [1]. Задаваясь рядом значений полных давлений пассивного газа на входе в эжектор $P_{п0}^*$ и выполняя расчеты, аналогичные приведенным на рис. 4, определим для ка-

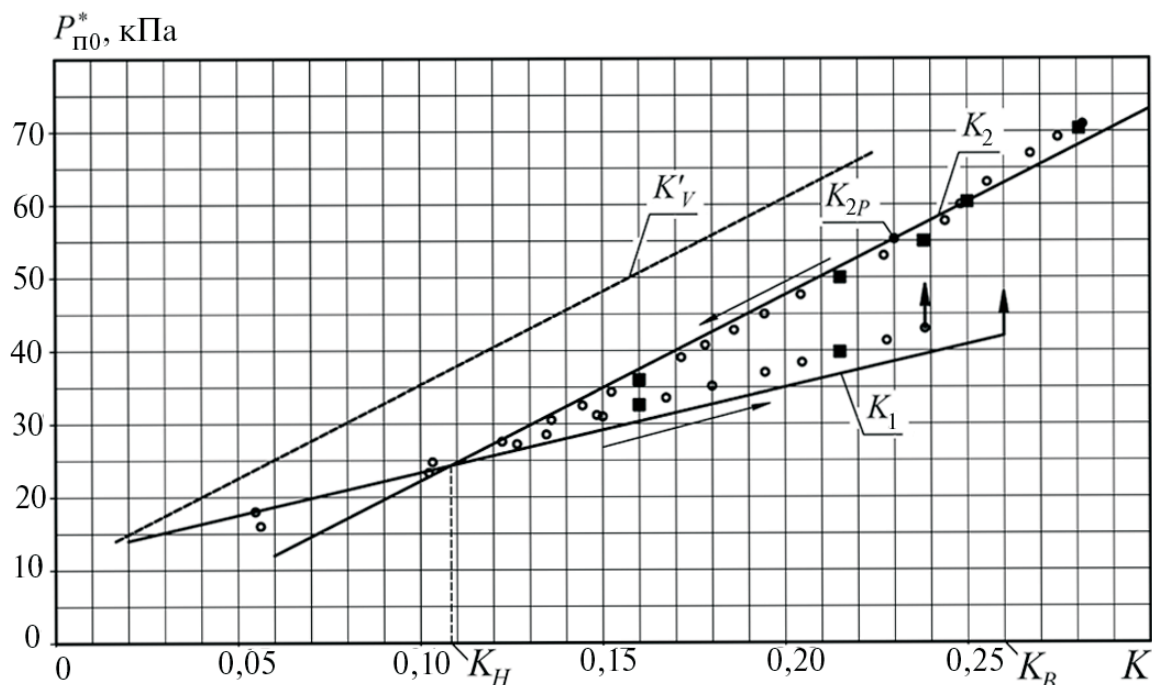


Рис. 7. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости $P_{п0}^*$ от K при $P_{c3} = 0,102...0,11$ МПа для газового эжектора с конической КС и сверхзвуковым соплом ($\alpha = 4,89$; $\beta = 0,444$; $f_a = 0,12$; $\bar{l}_{КС} = 6,45$; $P_{a0}^* = 5,13$ МПа; $T_a^* = T_n^* = 275$ К)

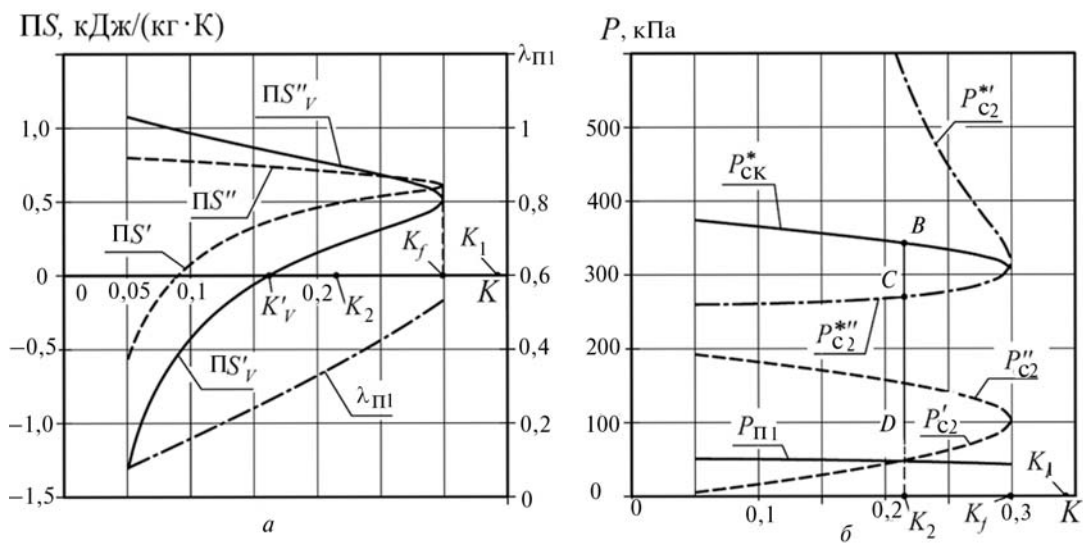


Рис. 8. Результаты расчета газового эжектора с конической камерой смешения ($\alpha = 4,89$; $\beta = 0,444$; $f_a = 0,12$; $l_{КС} = 6,45$; $P_{a0}^* = 5,13$ МПа; $P_{n0}^* = 0,051$ МПа; $z = 0,41$; $T_a^* = T_n^* = 275$ К)

ждного P_{n0}^* диапазон коэффициентов эжекции, в котором возможна, с точки зрения термодинамики необратимых процессов, реализация бóльшего корня уравнения эжекции (18) (см. [1]), соответствующего сверхзвуковому режиму течения смеси в выходном сечении КС. Запирание КС за счет реализации сверхзвуковых или звуковых режимов течения смеси газов в выходном ее сечении соответствует второму критическому режиму работы эжектора. На рисунке 8, а приведены зависимости, полученные в результате одного из таких расчетов. Видно, что второй критический режим может реализоваться в диапазоне коэффициентов эжекции $K'_v \dots K_f$. Нанесем на рис. 7 расчетную зависимость $K'_v = f(P_{n0}^*)$ и определенный выше (см. рис. 4) расчетный коэффициент эжекции, отмеченный на рис. 7 как K_{2p} , удовлетворительно согласующийся с экспериментальным коэффициентом K_p , при значении $(P_{n0}^*)_p$, соответствующем расчетному режиму истечения газа из сопла. На основании приведенной на рис. 7 экспериментальной зависимости можно предположить, что при других значениях P_{n0}^* , отличных от $(P_{n0}^*)_p$, второй критический режим будет реализоваться при значениях K_2 , лежащих на кривой $K_2 = f(P_{n0}^*)$,

проведенной эквидистантно кривой $K'_v = f(P_{n0}^*)$ и проходящей через точку K_{2p} .

Одновременно с построением зависимости $K_2 = f(P_{n0}^*)$ для каждого значения P_{n0}^* по уравнениям, приведенным в [1], рассчитываем коэффициент эжекции K_1 , при котором реализуется первый критический режим, приводящий к запиранию входного цилиндрического участка конической КС. Далее определяем попадает ли K_1 в диапазон коэффициентов эжекции, в котором уравнения эжекции имеют решения и только в котором могут быть реализованы первый критический, докритический и второй критический режимы работы эжектора. На рисунке 7 сплошной линией приведена расчетная зависимость $K_1 = f(P_{n0}^*)$ и стрелкой вверх на ней отмечено максимальное значение P_{n0}^* , до которого может быть реализован первый критический режим работы эжектора. Этому значению P_{n0}^* соответствует коэффициент эжекции K_B (см. рис. 7).

На рисунке 7 видно, что в диапазоне коэффициентов эжекции $K_H - K_B$ можно получить дроссельную характеристику, аналогичную представленной на рис. 6, где K_H — коэффициент эжекции в точке пересечения кривой $K_2 = f(P_{n0}^*)$ с кривой $K_1 = f(P_{n0}^*)$. При коэффициентах эжекции больших K_B эксперименталь-

ная дроссельная характеристика эжектора имеет вид, аналогичный приведенным на рис. 3, 5, т. е. состоит только из второго критического и докритического режимов работы. При коэффициентах эжекции меньших K_H дроссельная характеристика также имеет только один критический режим, независимо от условий запуска эжектора, и он соответствует первому критическому режиму. Это следует из того, что при $K < K_H$ коэффициент эжекции для первого критического режима (K_1) меньше коэффициента эжекции для второго критического режима (K_2) при одном и том же значении $P_{п0}^*$ (см. рис. 7). Поэтому первый критический режим будет осуществляться раньше второго критического режима как при переходе с докритического режима работы к критическому при уменьшении противодавления, так и при запуске эжектора с любой последовательностью подачи смешиваемых газов в силу того, что еще до запираания выходного сечения КС произойдет запираание ее входного сечения.

Сопоставим экспериментальную дроссельную характеристику эжектора, приведенную на рис. 6, а для $K_э = 0,215$, с расчетной. По рисунку 7 для этого коэффициента эжекции находим расчетное значение давления $P_{п0}^* = 0,051$ МПа, при котором реализуется второй критический режим. Да-

лее для найденного значения $P_{п0}^* = 0,051$ МПа рассчитываем в соответствии с [1] зависимости, аналогичные приведенным на рис. 4, б, используя, как было отмечено выше, определенный из эксперимента для второго критического режима параметр $z = 0,41$. На рисунке 8, б представлены результаты расчета. На этом рисунке приведен расчетный коэффициент эжекции $K_2 = 0,215$, при котором реализуется второй критический режим, и коэффициент эжекции K_1 для первого критического режима, рассчитанный по уравнениям из [1]. Видно, что K_1 находится вне диапазона коэффициентов эжекции, в котором уравнения эжекции имеют решения. В силу этого его реализация при $P_{п0}^* = 0,051$ МПа невозможна.

Используя уравнения из работы [1] для расчета первого критического режима, определяем полное давление пассивного газа $P_{п0}^*$, при котором может реализоваться первый критический режим с коэффициентом эжекции $K_1 = 0,215$. Для найденного таким образом значения $P_{п0}^* = 0,036$ МПа рассчитываем зависимости, аналогичные приведенным на рис. 8. На рисунке 9 приведены результаты этих расчетов. При расчете использовалось значение параметра $z = 0,147$, определенное экспериментально для первого критического режима работы. На

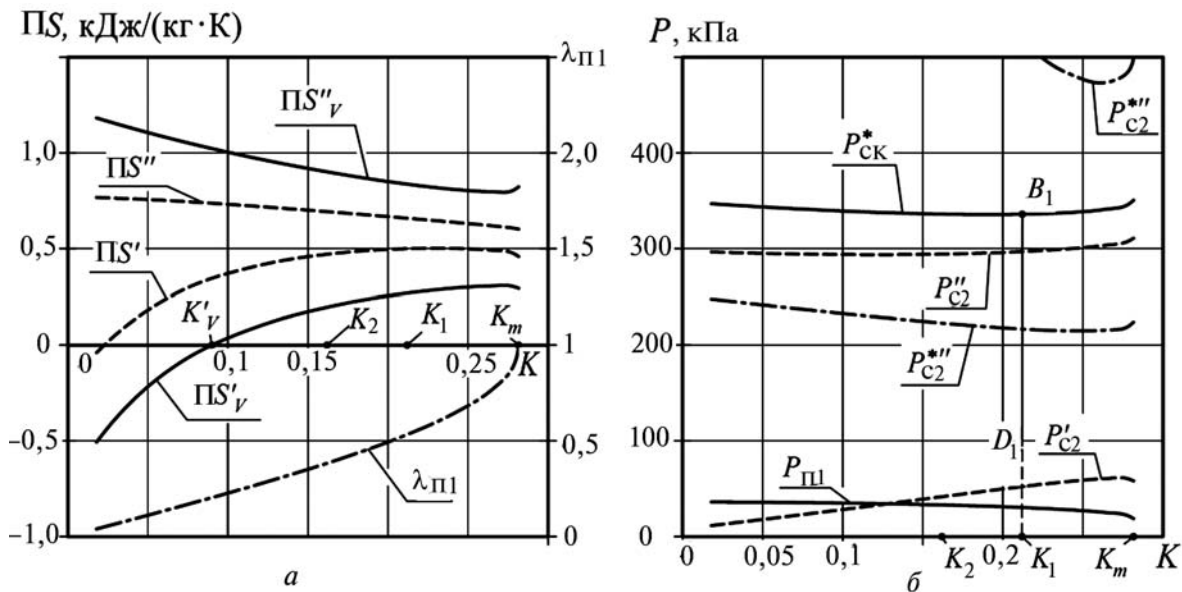


Рис. 9. Результаты расчета газового эжектора с конической камерой смешения ($\alpha = 4,89$; $\beta = 0,444$; $f_a = 0,12$; $l_{КС} = 6,45$; $P_{a0}^* = 5,13$ МПа; $P_{п0}^* = 0,036$ МПа; $z = 0,147$; $T_a^* = T_{п0}^* = 275$ К)

этот рисунок также нанесен коэффициент эжекции $K_1 = 0,215$, рассчитанный для первого критического режима, и коэффициент эжекции $K_2 = 0,16$, соответствующий второму критическому режиму, которые могут реализоваться при $P_{п0}^* = 0,036$ МПа. Видно, что в этом случае величина коэффициента эжекции K_1 находится в диапазоне коэффициентов эжекции, в котором уравнения эжекции имеют решения, а значит при определенных условиях, указанных выше, первый критический режим может быть реализован.

На рисунке 8, б, аналогично рис. 4, б, изображен участок BD дроссельной характеристики эжектора для второго критического режима, а на рис. 9, б — участок B_1D_1 характеристики, соответствующий первому критическому режиму. На рисунке 6, а сплошной линией показана расчетная дроссельная характеристика эжектора для коэффициента эжекции $K = 0,215$, построенная в соответствии с изложенным выше. Участок BD характеристики соответствует второму критическому режиму, участок B_1D_1 — первому критическому режиму, а участок AC — докритическому режиму работы эжектора.

На рисунке 5, а нанесена расчетная режимная характеристика, построенная аналогично изложенному выше. Из сопоставления результатов расчета с приведенным в статье экспериментом видно удовлетворительное их согласование.

В заключении необходимо отметить, что экспериментально полученный в ограниченном диапазоне коэффициентов эжекции и при определенном порядке запуска эжектора с конической КС первый критический режим име-

ет более высокий КПД по сравнению со вторым критическим режимом. Так, например, на начальном критическом режиме в точке B дроссельной характеристики, приведенной на рис. 6, адиабатический КПД эжектора, рассчитанный по формуле

$$\eta = K \frac{\left[\left(P_{c3}^* / P_{п0}^* \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{\left[1 - \left(P_{c3}^* / P_{a0}^* \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]},$$

где n — показатель адиабаты, равен $\eta_B = 0,289$, а в точке B_1 дроссельной характеристики — $\eta_{B_1} = 0,354$.

Более высокое значение КПД указывает на то, что процесс эжектирования пассивного газа на первом критическом режиме, при котором сопло активного газа работает в режиме недо-расширения, является более эффективным по сравнению с процессом, протекающим на втором критическом режиме.

Литература

1. Цегельский В.Г. К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 2. С. 46–71.
2. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 405 с.
3. Васильев Ю.Н. Теория сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты. 1967. Вып. 2. С. 171–235.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 824 с.

Статья поступила в редакцию 15.12.2011