

УДК 621.527.4/5

DOI: 10.18698/0536-1044-2015-11-85-96

Численное и экспериментальное определение оптимальной длины цилиндрической камеры смешения сверхзвукового газового эжектора

М.В. Акимов, Т.Д. Сафаргалиев, П.В. Папырин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Numerical and Experimental Determination of the Optimal Length of Cylindrical Mixing Chamber of Supersonic Gas Ejector

M.V. Akimov, T.D. Safargaliev, P.V. Papyrin

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

@ e-mail: 6732062@mail.ru

i Представлены результаты численных расчетов с использованием пакета программ Ansys Fluent 12.0 и экспериментальных исследований сверхзвуковых газовых эжекторов, имеющих различную длину цилиндрической камеры смешения. Достигнуто удовлетворительное согласование расчетного и экспериментального значений оптимальной относительной длины цилиндрической камеры смешения (12–15 калибров). Если относительная длина камеры смешения составляет более семи-восьми калибров, погрешность расчета основных параметров сверхзвукового газового эжектора не превышает 11 %, при меньшей длине погрешность расчета достигают 35 %. На основании результатов численного моделирования течения в проточной части показано, что при работе на критических режимах в цилиндрической камере смешения эжектора образуется сверхзвуковой неравномерный поток газа, его торможение осуществляется в сложной системе скачков уплотнения, протяженность которой в зависимости от условий работы эжектора может составлять несколько калибров.

Ключевые слова: газовый эжектор, оптимальная длина цилиндрической камеры смешения, численный расчет, критический режим.

i The article presents the results of numerical calculations and experimental investigations of supersonic gas ejectors with cylindrical mixing chambers of different lengths. The calculations were performed using Ansys Fluent 12.0 software package. Satisfactory agreement between the calculated and the experimental values of the optimal relative length of the cylindrical mixing chamber is shown. The optimal relative length is in the range of 12–15 calibers. When the mixing chamber relative length is more than 7–8 calibers, the calculating error of the basic parameters of the supersonic gas ejector does not exceed 11 %, while for smaller relative lengths it reaches 35 %. The results of numerical simulation of the flow show that during critical operation stages a supersonic non-uniform gas jet is formed in the cylindrical mixing chamber. The jet is decelerated through a complex system of shock waves, the length of which may be several calibers depending on the ejector working conditions.

Keywords: gas ejector, optimal length of a cylindrical mixing chamber, numerical calculation, critical operation.

Благодаря таким преимуществам, как отсутствие подвижных частей и простота конструкции, газо-газовые (парогазовые) эжекторы применяют во многих отраслях промышленности: нефтегазоперерабатывающей, химической, аэрокосмической (в том числе при стендовой отработке ракетных двигателей с имитацией высотных условий).

При незначительной высотности сопла ракетного двигателя необходимая степень сжатия продуктов сгорания невелика. Проведенные исследования показали, что при относительно небольшой степени расширения активного газа (не более 30–100) и степени сжатия пассивного газа не более 2–3 эффективно использовать сверхзвуковые газовые эжекторы с цилиндрической камерой смешения (КС), так как при указанных параметрах они имеют максимальный КПД.

К настоящему времени опубликовано большое число работ, посвященных исследованиям и оптимизации сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической КС. Предложенные методики расчета таких аппаратов можно условно подразделить на две группы: интегральные и численные.

Интегральные методики [1–3] базируются на совместном решении уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, записанных для входного и выходного сечений КС (уравнения эжекции). Кроме того, используются дополнительные уравнения для расчета наиболее выгодных критических режимов. По данным методикам получено удовлетворительное согласование результатов расчета и экспериментального исследования сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической КС. Однако в рамках рассматриваемого подхода для расчета оптимальных осевых размеров эжектора (прежде всего длины КС) требуются эмпирические коэффициенты.

Применение численных методов для расчета сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической КС позволяет определить параметры потока в любой точке проточной части, а также оптимизировать как радиальные, так и осевые геометрические размеры аппарата [4]. Но поскольку в проточной части эжектора смешиваются сверхзвуковой и дозвуковой потоки газа, имеется значительная неравномерность параметров в радиальном и осевом направлениях, кроме того, сверхзвуковой поток тормозится и при этом образуются сложные системы скачков уплотнения, поэтому корректность результатов, получаемых численными методами, требу-

ет экспериментального подтверждения.

Некоторыми авторами (см., например, [5]) на основе проведенного сопоставления экспериментальных и расчетных данных аналогичных течений до сих пор предлагаются доработки существующих физических и математических моделей, что говорит о сложности моделирования этих течений и необходимости экспериментального подтверждения. В большинстве опубликованных на данный момент работ, в которых проводится сопоставление результатов эксперимента и численного моделирования для эжекторов (см., например [4, 6]), сравнение выполняют только по коэффициенту эжекции при прочих равных условиях. Однако кроме коэффициента эжекции для эжектора существует такой важный параметр, как максимальная степень сжатия при заданном коэффициенте эжекции, поэтому без выполнения сравнения по данному параметру сопоставление результатов эксперимента и численного моделирования будет неполным.

В настоящей работе приведены результаты численного расчета с использованием пакета программ Ansys Fluent 12.0 сверхзвуковых газовых эжекторов, в том числе оптимальной длины цилиндрической КС, и выполнено сравнение результатов расчета и эксперимента.

Экспериментальная установка и испытанные модели. Испытания сверхзвуковых газовых эжекторов проводили на экспериментальной установке МГТУ им. Н.Э. Баумана, подробное описание которой приведено в [7]. В качестве эжектирующего (активного) и эжектируемого (пассивного) газов использовался воздух. Температуры торможения активного T_{01} и пассивного T_{02} газов при испытаниях были одинаковы и мало отличались от 280 К, полное давление активного газа p_{01} поддерживалось равным 5,14 МПа. Основные геометрические размеры исследованных эжекторов приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Безразмерные геометрические параметры эжектора: геометрическая степень расширения сопла активного газа — 0,12; основной геометрический параметр эжектора (отношение площадей пассивного и активного газа во входном сечении) — 4,89; относительная длина КС (отношение длины $L_{КС}$ к диаметру $D_{КС}$) — 3,5...15,3. При проведении экспериментов варьировалась только длина цилиндрической КС, остальные геометрические размеры проточной части эжектора и сопла активного газа не изменялись.

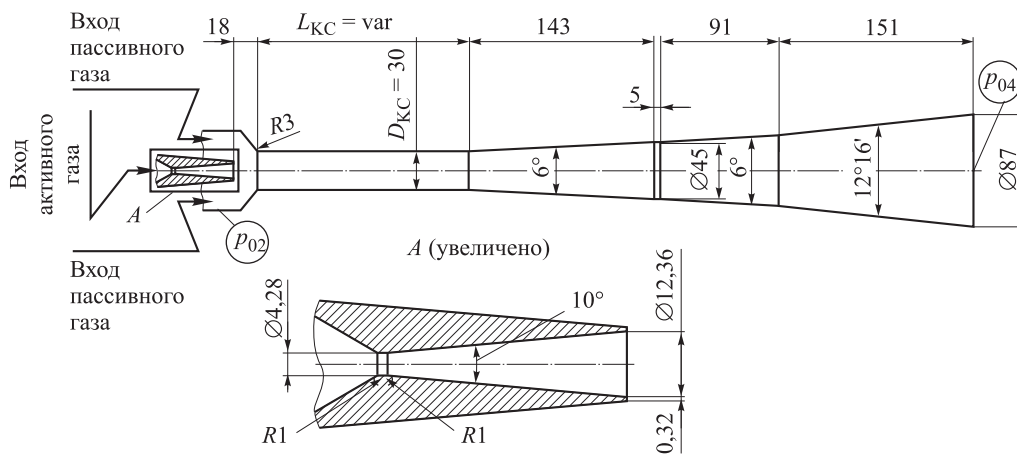


Рис. 1. Геометрические размеры эжектора

Таблица 1

Геометрические размеры цилиндрической КС испытанных эжекторов

Геометрические размеры	1	2	3	4
$L_{КС}$, мм	105	189	354	459
$L_{КС}/D_{КС}$	3,5	6,3	11,8	15,3

Для каждого эжектора фиксированной геометрии были получены следующие характеристики: *дроссельная* — зависимость полного давления пассивного газа p_{02} на входе в эжектор от полного давления на выходе p_{04} (противодавления) при постоянном коэффициенте эжекции K ; *режимная* — зависимость p_{02} от коэффициента эжекции K на критических режимах работы при низком значении давления p_{04} . Методика построения экспериментальных режимных и дрессельных характеристик по-

дробно описана в [3]. Кроме того, проводились замеры статического давления по длине проточной части эжектора на различных режимах работы.

Численное моделирование процессов в сверхзвуковом газовом эжекторе. В настоящей работе для численного расчета сверхзвукового газового эжектора с использованием программы Ansys Fluent 12.0 в качестве расчетной модели принята осесимметричная двумерная область (рис. 2). Для эжекторов, основные геометрические размеры которых приведены на рис. 1 и в табл. 1, а также для эжекторов, у которых длина КС равна 27 и 582 мм, строили расчетные сетки в программе ICEM CFD. При проведении расчетов в качестве первого приближения использовали грубые сетки. В дальнейшем для увеличения точности расчета сетки

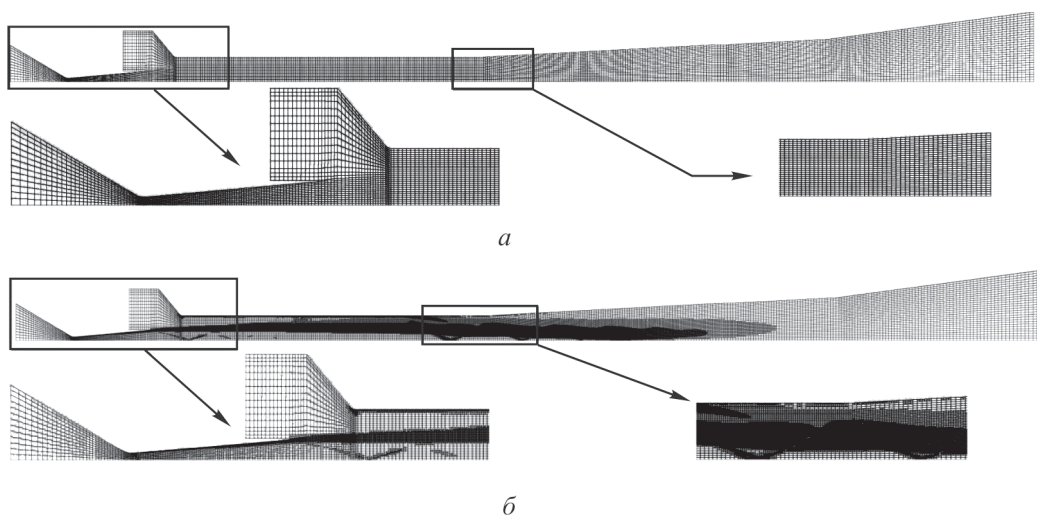


Рис. 2. Пример структуры сеток эжектора № 2:
 а — начальная сетка (13 292 ячейки); б — адаптированная сетка (71 762 ячейки)

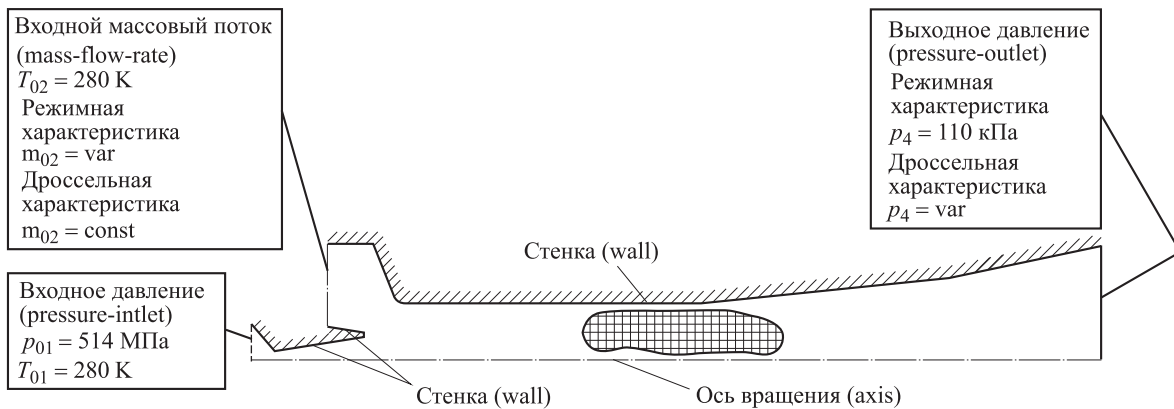


Рис. 3. Граничные условия

адаптировали (разбивали крупные ячейки на более мелкие в определенных областях модели на основании решения, полученного на начальной грубой сетке) по градиенту числа Маха, при этом получали более мелкую структуру сеток в пристеночных областях, на границах смешивающихся потоков и в области скачков уплотнения (см. рис. 2).

Для описания объемных эффектов в двумерной модели использовали осесимметричный решатель (axisymmetric solver). Течение газа в эжекторе было определено в Ansys Fluent 12.0 как стационарное турбулентное течение сжимаемого идеального газа. Для решения нелинейных уравнений использовали связанный неявный решатель, основанный на плотности (coupled-implicit density-based solver). Во всех расчетах использовали модель турбулентности, основанную на теории ренормализованных групп (RNG $k-\epsilon$), которая, как показано в работах [4, 6, 8, 9], дает наименьшую погрешность при расчете подобных течений. Уравнения течения решали с помощью схемы дискретизации пространства второго порядка (second-order upwind), а уравнения турбулентности (уравнения турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации) — с помощью схемы первого порядка (first-order upwind). Стандартную пристеночную функцию (standart wall function) использовали для расчета течения в области стенки.

При расчете дроссельной характеристики устанавливали следующие граничные условия (рис. 3): на входе в сопло активного газа — входное давление, или pressure inlet (задавали полное давление $p_{01} = 5,14$ МПа и температуру торможения $T_{01} = 280$ К); на входе пассивного газа — входной массовый поток, или mass-flow-

inlet (задавали полную температуру $T_{02} = 280$ К и некоторый фиксированный расход пассивного газа); на выходе из эжектора — выходное давление, или pressure-outlet (задавали несколько фиксированных значений статического давления).

При расчете режимной характеристики устанавливали различные расходы пассивного газа, а статическое давление на выходе из эжектора p_4 принимали постоянным и равным 110 кПа. Для расчета дроссельной характеристики задавали различное статическое давление на выходе из эжектора p_4 при постоянном расходе пассивного газа. Для стенок сопла, КС и диффузора устанавливали граничное условие «стенка», или wall, — стационарная гидродинамически гладкая (без проявления эффекта шероховатости) адиабатическая стенка без проскальзывания потока на ней.

Считалось, что в решении задачи достигнута сходимость, если разность между итерациями при решении уравнений неразрывности, количества движения, энергии, турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации достигала 10^{-6} . Для увеличения скорости сходимости задачи и уменьшения времени расчета настраивали факторы нижней релаксации (under-relaxation factors) и число Курента (Courant number). В результате расчета определяли расход активного газа m_1 через сверхзвуковое сопло, а также полное давление пассивного газа на входе в эжектор p_{02} .

Полученные результаты и их анализ. *Режимные характеристики.* В качестве примера на рис. 4–6 приведены результаты исследования эжектора 3 (см. табл. 1). Необходимо отметить, что при построении экспериментальной ре-

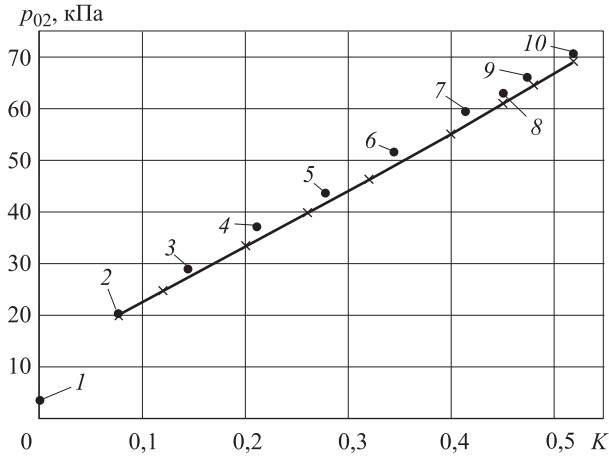


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная режимные характеристики (1-10 — экспериментальные точки) эжектора 3:
 ● — эксперимент; ✕ — расчет

жимной характеристики эжектора 3 (см. рис. 4) давление после эжектора p_{04} было значительно меньше, чем противодействие на предельном критическом режиме — этим гарантировалось получение критического режима работы эжектора.

Как видно на рис. 4, 5, на начальном участке цилиндрической КС статическое давление падает, что приводит к разгону пассивного потока и образованию в некотором сечении (сечении запираания) сверхзвукового потока, полностью заполняющего поперечное сечение КС. В этом случае малые возмущения давления не

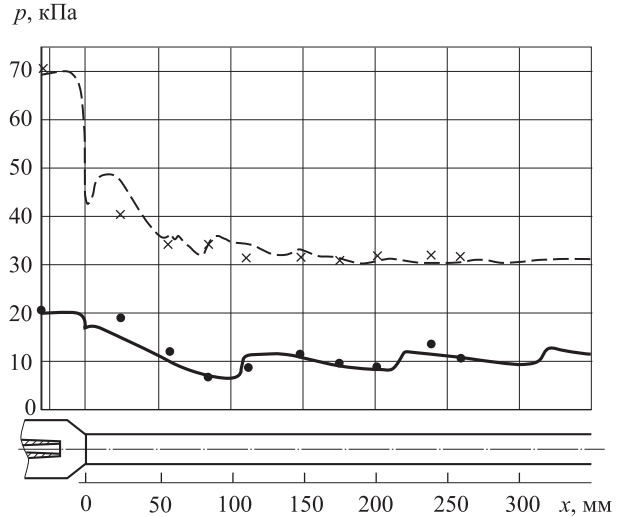


Рис. 5. Экспериментальное и расчетное распределения статического давления по длине КС эжектора № 3 на критическом режиме при различных значениях коэффициента эжекции:
 $K = 0,077$: ● — эксперимент (точка 2 на рис. 4); — — расчет;
 $K = 0,518$: ✕ — эксперимент (точка 10 на рис. 4); - - - - расчет

передаются вверх по потоку, вследствие чего эжектор работает на критическом режиме. На рис. 6 видно, что в сечении запираания образуется неравномерное в радиальном направлении поле скоростей, которое при низких значениях давления p_{04} сохраняет существенную неравномерность вплоть до выходного сечения КС.

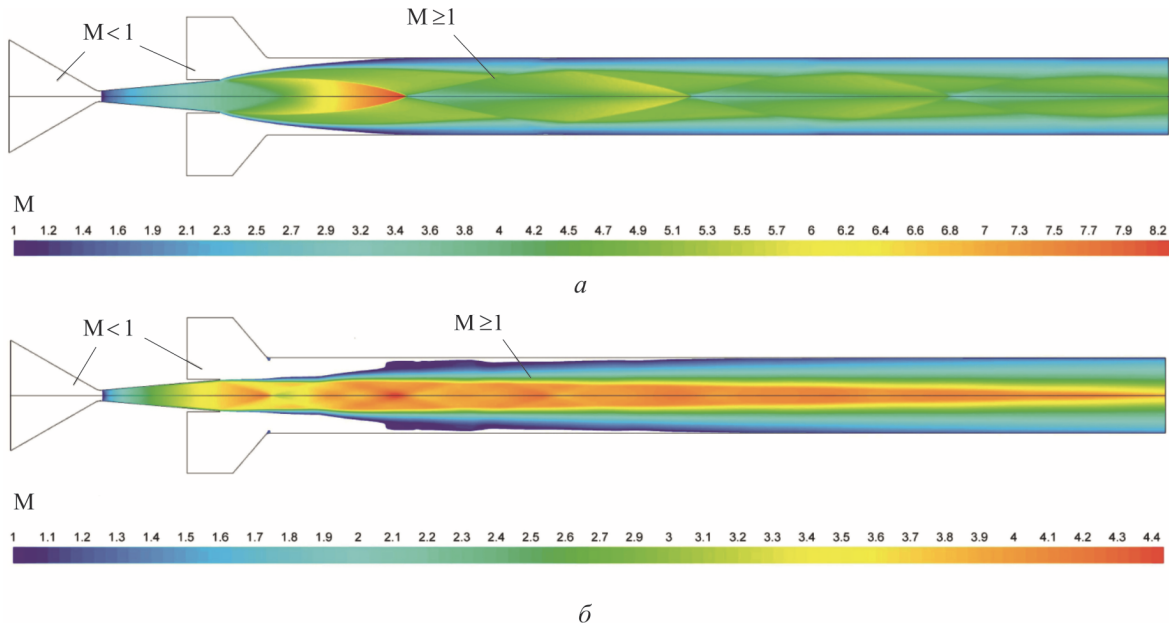


Рис. 6. Расчетные поля скоростей в проточной части эжектора 3 на критическом режиме: $K = 0,077$ (а); $K = 0,518$ (б)

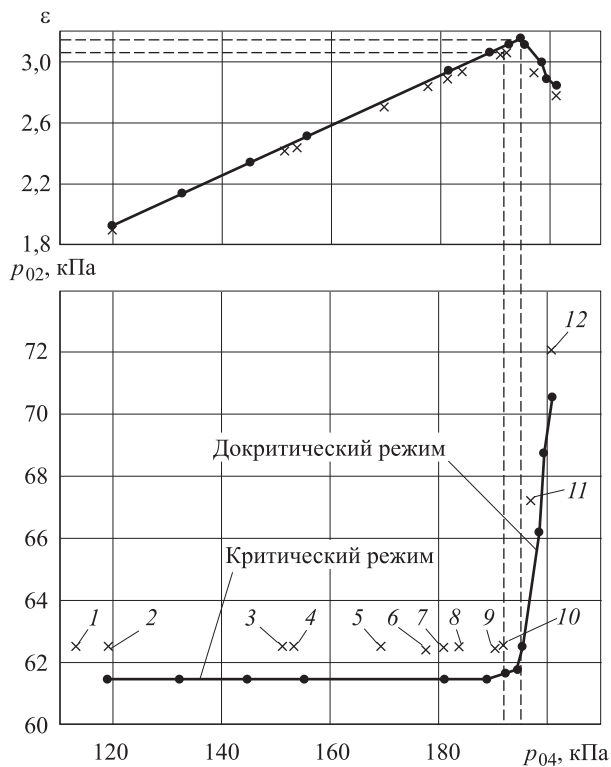


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные дроссельные характеристики и зависимость степени сжатия от противодействия (1-12 — экспериментальные точки) эжектора 3 при $K = 0,45$:
 × — эксперимент; • — расчет

Из рис. 5, 6 следует, что сечение запирания располагается на расстоянии не более двух-трех диаметров от входного сечения КС, следовательно, режимная характеристика не должна изменяться у эжекторов, которые имеют длину КС более трех калибров, что и подтверждают результаты проведенных экспериментов: полное давление пассивного газа p_{02} при одинаковых значениях коэффициента эжекции не изменяется для аппаратов, у которых длина КС равна 3,5 и 15,3 калибра.

Погрешность расчета полного давления пассивного газа p_{02} режимной характеристики (см. рис. 4) на критических режимах работы эжектора варьируется в диапазоне 1,6...6,2%, причем большие значения погрешности соответствуют меньшим значениям коэффициента эжекции. Согласно рис. 5, расчетное и экспериментальное распределение статического давления по длине проточной части эжектора согласуются удовлетворительно.

Дроссельные характеристики. На рис. 7-9 приведены результаты исследования эжектора 3 (см. табл. 1). Аналогичные зависимости были получены и для других исследованных эжекторов. Дроссельная характеристика состоит из горизонтального участка, соответствующего работе эжектора на критическом режиме, и наклонного участка, на котором реализуются

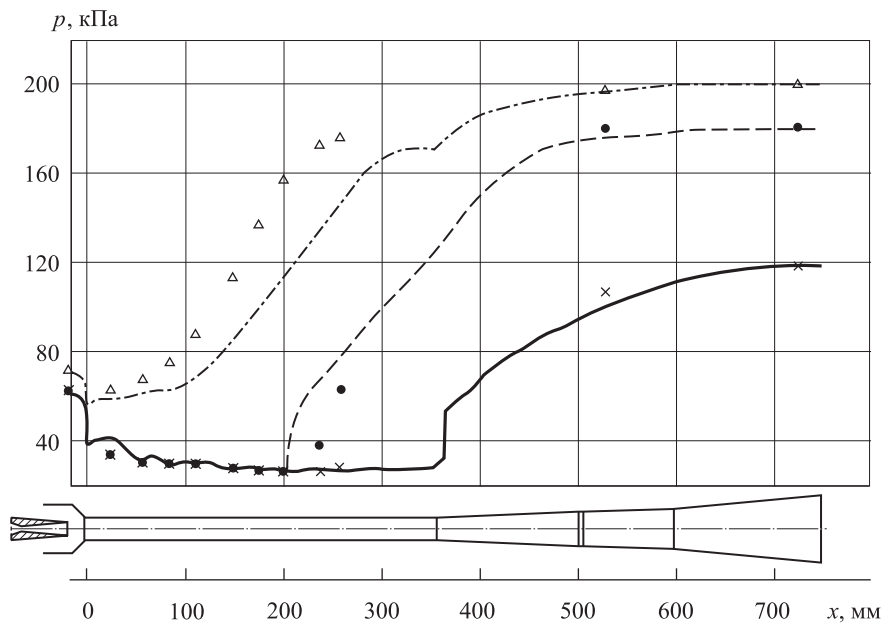


Рис. 8. Экспериментальное и расчетное распределение статического давления по длине проточной части эжектора 3 при $K = 0,45$ и различных значениях противодействия:
 $p_{04} = 119$ кПа: × — эксперимент (точка 2 на рис. 7); — — — расчет;
 $p_{04} = 181$ кПа: • — эксперимент (точка 7 на рис. 7); - - - - расчет;
 $p_{04} = 201$ кПа: Δ — эксперимент (точка 12 на рис. 7); - · - · - расчет

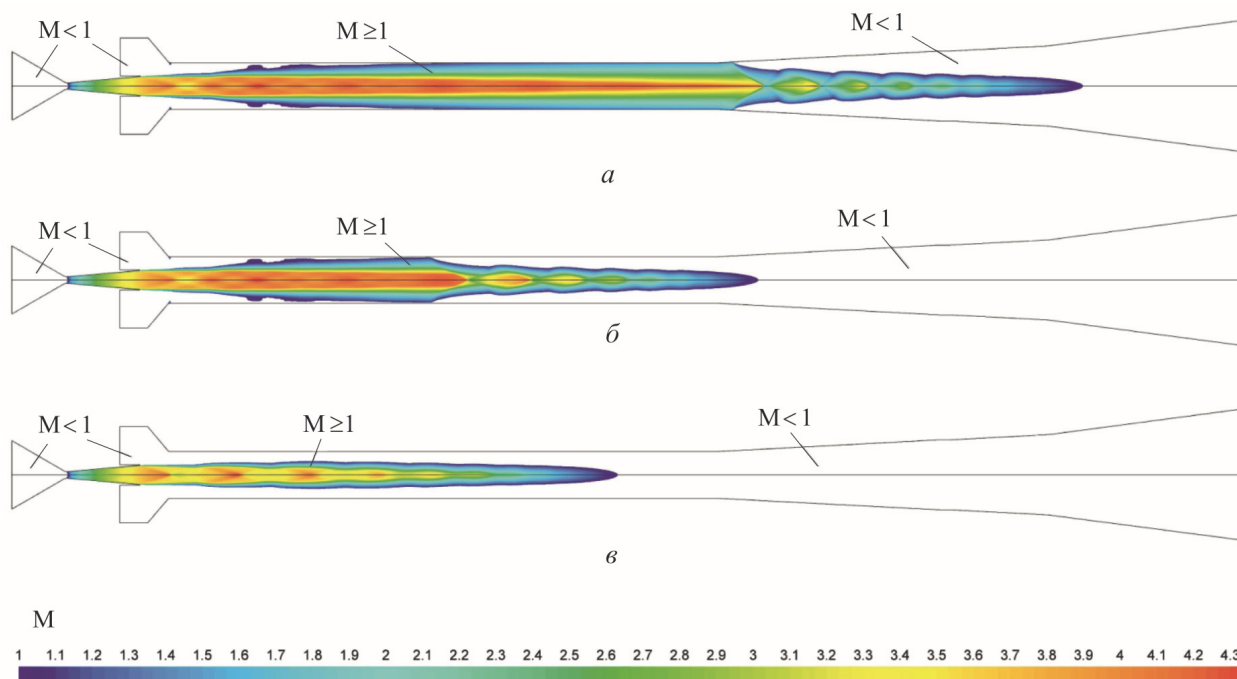


Рис. 9. Расчетное поле скоростей в проточной части эжектора 3 при $K = 0,45$ и различных значениях давления на выходе:
 $p_{04} = 119$ кПа (а); $188,5$ кПа (б); 201 кПа (в)

докритические режимы работы (см. рис. 7). Из рис. 8 ясно, что на критическом режиме с увеличением противодействия система скачков давления перемещается по диффузору и КС, при этом распределение давления на начальном участке КС (до сечения запираания) и давление пассивного газа не изменяются. После того как значение p_{04} превысит противодействие в точке 9 (см. рис. 7), возмущения с выхода эжектора достигают сечения запираания, после чего аппарат переходит на докритический режим работы и давление пассивного газа p_{02} начинает возрастать.

На рис. 9 видно, что при работе эжектора на критических режимах в сечении запираания, которое располагается на начальном участке КС, сверхзвуковой неравномерный поток газа занимает всю площадь поперечного сечения КС, что препятствует распространению возмущений против потока при увеличении противодействия.

Результаты расчета также показывают, что торможение неравномерной сверхзвуковой смеси газов происходит в сложной системе скачков уплотнения, которая имеет значительную протяженность в осевом направлении. При работе эжектора на критическом режиме с возрастанием противодействия p_{04} система скачков уплот-

нения перемещается из диффузора в КС (см. рис. 8, 9). В точке перехода с критического режима на докритический (предельный критический режим) торможение сверхзвукового потока начинается вблизи сечения запираания, а в выходном сечении КС течет дозвуковой поток. При работе на докритическом режиме по всей длине КС имеется зона дозвуковых скоростей.

На рис. 7 кроме дроссельной характеристики также приведены расчетные и экспериментальные значения степени сжатия эжектора ϵ — отношения полного давления на выходе p_{04} к полному давлению пассивного газа на входе в эжектор p_{02} . На рис. 7 видно, что максимальное значение степени сжатия реализуется около точки перехода критического режима в докритический (на предельном критическом режиме). Аналогичные результаты были получены для других исследованных эжекторов при различных коэффициентах эжекции и длинах КС, близких к оптимальным (рис. 10), а также в работах других авторов (см., например, [1]).

Однако для эжектора, у которого длина КС значительно меньше оптимальной, расчетным и экспериментальным путем было показано, что максимальная степень сжатия реализуется не на предельном критическом режиме, а в области докритических режимов (рис. 11). Это

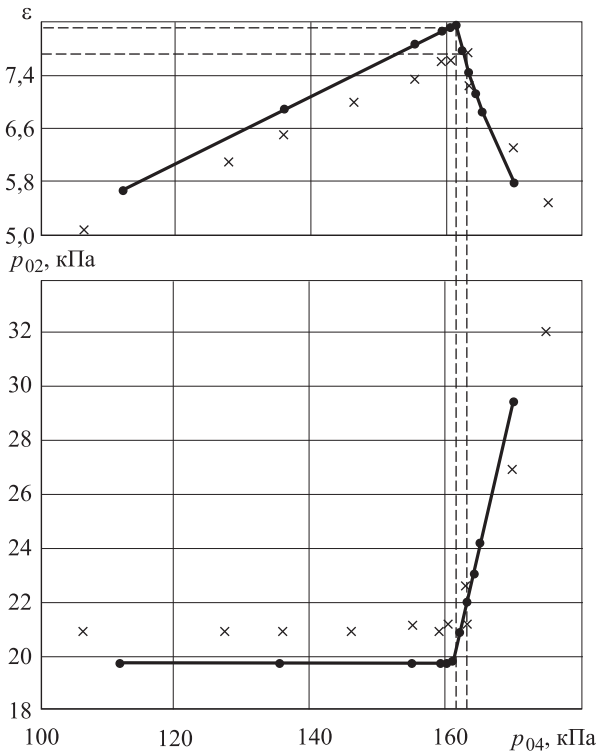


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные дроссельные характеристики и зависимости степени сжатия от противодавления эжектора 4 при $K = 0,077$:
 x — эксперимент, ● — расчет

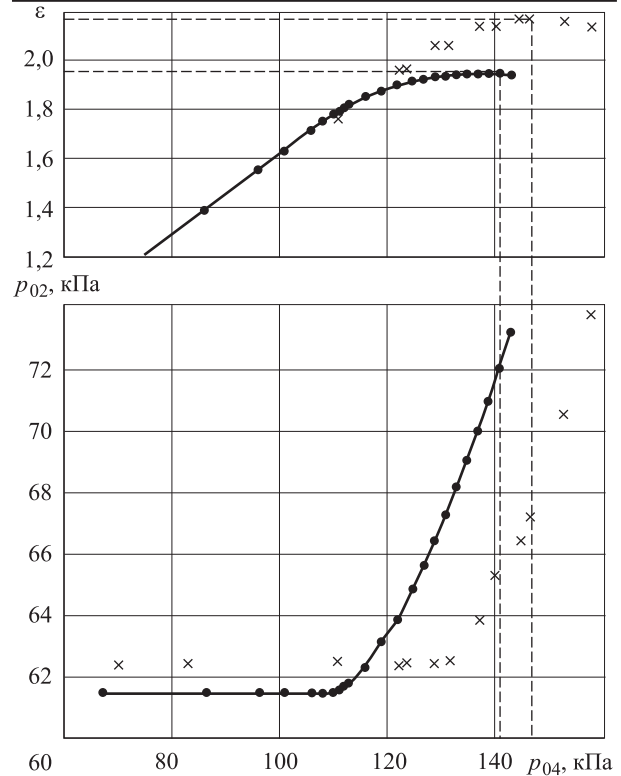


Рис. 11. Экспериментальные и расчетные дроссельные характеристики и зависимости степени сжатия от противодавления эжектора 1 при $K = 0,45$:
 x — эксперимент, ● — расчет

может быть связано с тем, что у эжекторов с короткой КС система скачков уплотнения даже на предельном критическом режиме частично располагается в диффузоре, который имеет большую площадь поперечного сечения, чем КС. В определенной области параметров при переходе на докритический режим снижение степени расширения активного потока, вызванное увеличением давления пассивного газа, компенсируется уменьшением потерь в системе скачков уплотнения, которая становится более короткой и большей частью располагается в КС.

Необходимо отметить, что смещение точки реализации максимальной степени сжатия наблюдалось только для эжекторов, которые имели длину КС значительно меньшую оптимальной. Кроме того, получено, что возможность реализации указанного эффекта зависит от значения коэффициента эжекции и ряда других факторов.

Для всех исследованных эжекторов результаты численного расчета основных параметров (табл. 2) были сопоставлены с результатами экспериментального исследования.

Таблица 2

Максимальные погрешности (%) расчета основных параметров эжектора при коэффициенте эжектора $K = 0,077/0,45$

Параметр	Относительная длина КС			
	3,5	6,3	11,8	15,4
p_{02}^*	6,3/1,6	6,1/1,7	6,2/1,6	6,1/1,8
p_{04max}^*	40/16	20,4/11,6	4,8/1,5	1,2/0,6
ϵ_{max}	35/10,6	11/7,9	8,4/2,8	7/0,4

Примечание. p_{02}^* — полное давление пассивного газа на критическом режиме работы; p_{04max}^* — противодавление на предельном критическом режиме; ϵ_{max} — максимальная степень сжатия

Из представленных результатов ясно, что погрешность расчета максимальной степени сжатия не превышает 11 % при длине цилиндрической КС более семи-восьми калибров (оптимальная длина). Для более короткой КС погрешность существенно возрастает и достигает 35 % при малых значениях коэффициента эжекции. Точность расчета в практически важном диапазоне геометрических размеров эжектора можно признать удовлетворительной.

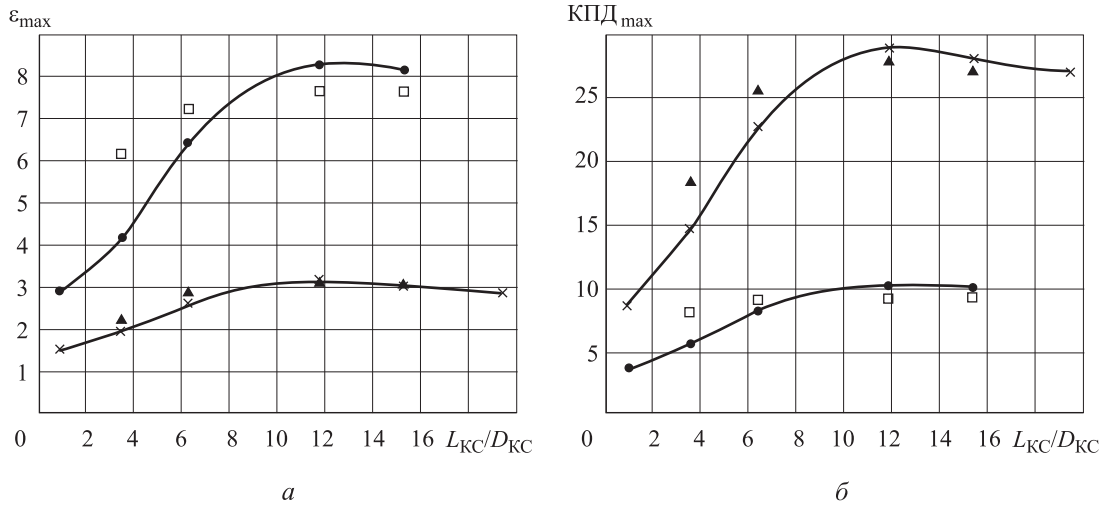


Рис. 12. Расчетная и экспериментальная зависимости максимальной степени сжатия (а) и адиабатического КПД (б) эжектора от длины цилиндрической КС при различных значениях коэффициента эжекции:
 $K = 0,077$: ● — расчет, □ — эксперимент; $K = 0,45$: × — расчет, ▲ — эксперимент

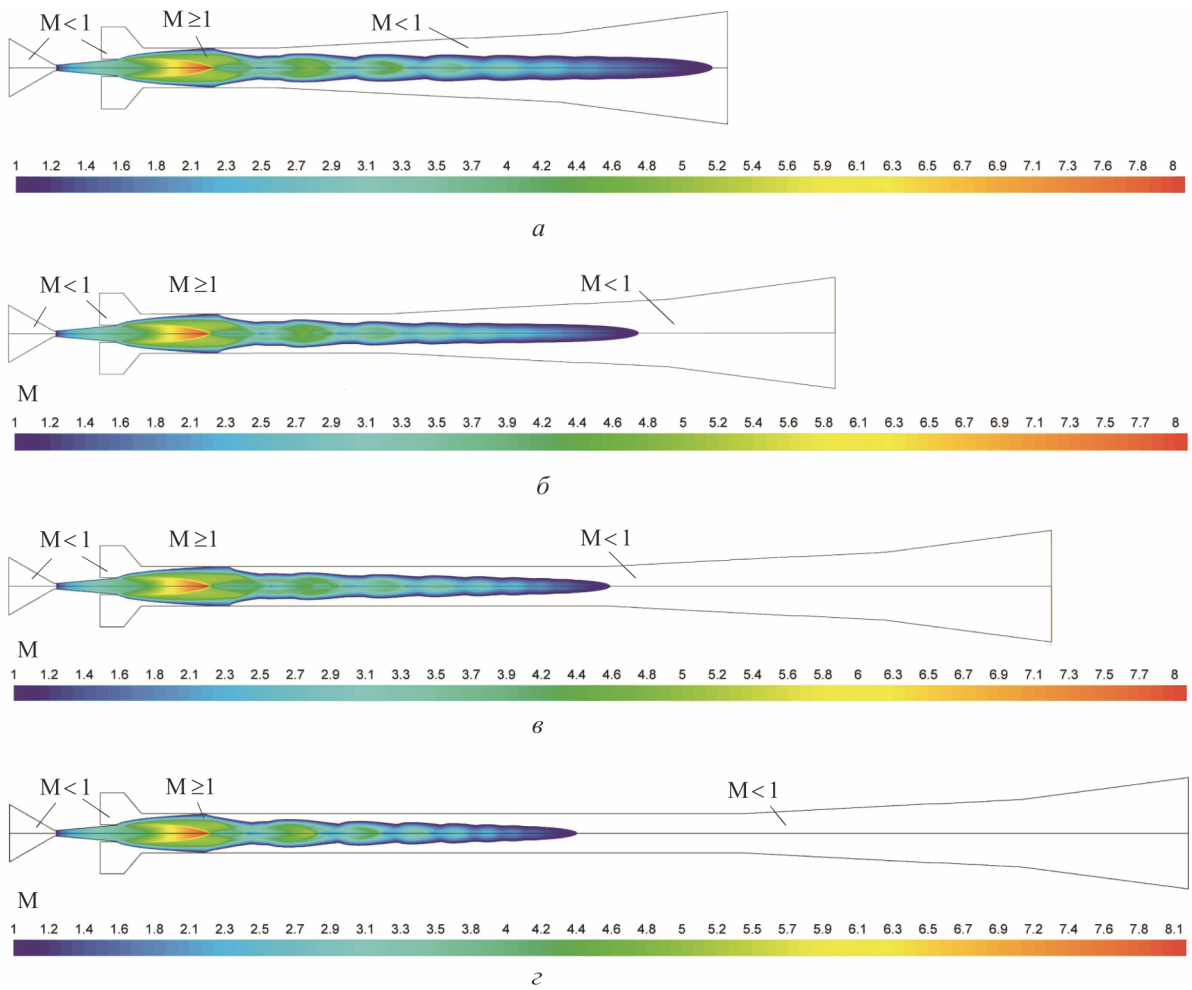


Рис. 13. Расчетное поле скоростей в проточной части эжекторов на режимах, близких к предельному критическому, при $K = 0,077$ и различной длине КС:
 а — $L_{\text{КС}}/D_{\text{КС}} = 3,5$; $p_{04} = 75$ кПа; б — $L_{\text{КС}}/D_{\text{КС}} = 6,3$; $p_{04} = 117$ кПа; в — $L_{\text{КС}}/D_{\text{КС}} = 11,8$; $p_{04} = 161$ кПа;
 г — $L_{\text{КС}}/D_{\text{КС}} = 15,3$; $p_{04} = 160$ кПа

Оптимальная длина цилиндрической КС. По результатам проведенных исследований были построены экспериментальные и расчетные зависимости максимальной степени сжатия и адиабатического КПД от относительной длины цилиндрической КС при различных коэффициентах эжекции (рис. 12). Значение адиабатического КПД эжектора вычисляли по формуле

$$\eta = K \frac{(p_{04}/p_{02})^{(n-1)/n} - 1}{1 - (p_{04}/p_{01})^{(n-1)/n}},$$

где n — показатель адиабаты.

На рис. 12 видно, что кривые степени сжатия и КПД имеют максимум, а оптимальная длина цилиндрической КС находится в диапазоне 12–15 калибров. Превышение оптимальной длины КС приводит к плавному снижению степени сжатия и КПД, в то же время для коротких КС это снижение происходит более резко.

Процессы, протекающие в проточной части эжектора при изменении длины цилиндрической КС, удобно проиллюстрировать, используя полученные расчетные поля скорости потока в проточной части (рис. 13). При близкой к оптимальной длине КС система скачков уплотнения, переводящая неравномерный сверхзвуковой поток газа в дозвуковой на предельном критическом режиме, начинается практически от сечения запирающего и заканчивается около выходного сечения цилиндрической КС эжектора. В более длинной КС протяженность и интенсивность системы скачков уплотнения не изменяются, но при этом возрастают потери на трение о стенки «дополнительного» участка КС, что вызывает плавное снижение степени сжатия и КПД. В короткой КС часть сверхзвукового потока располагается в диффузоре эжектора, который имеет большую площадь поперечного сечения, что приводит к значительному возрастанию потерь в скачках уплотнения и соответственно к снижению степени сжатия и КПД, несмотря на некоторое снижение потерь на трение в КС.

Литература

- [1] Васильев Ю.Н. Теория сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения. *Лопаточные машины и струйные аппараты: Сб. ст.*, Москва, Машиностроение, 1967, вып. 2, с. 171–235.
- [2] Милионщиков М.Д., Рябинков Г.М. Газовые эжекторы больших скоростей. *Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов: Тр. ЦАГИ*, Москва, 1961, с. 5–32.

Выводы

1. Оптимальная длина цилиндрической КС сверхзвукового газового эжектора, рассчитанная с помощью пакета Ansys Fluent 12.0, удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента. В исследованном диапазоне параметров оптимальная относительная длина цилиндрической КС составляет 12–15 калибров.

2. Погрешность расчета основных параметров эжектора при длине КС более семи-восьми калибров не превышает 11 %. При меньшей длине КС погрешность расчета максимальной степени сжатия возрастает и достигает 35 % при длине КС около 3,5 калибров. Расчетное распределение статического давления по длине проточной части эжектора удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента при длине КС, близкой к оптимальной.

3. На критическом режиме в сечении запирающего, расположенном на начальном участке цилиндрической КС, образуется сверхзвуковой неравномерный поток газа, который полностью занимает поперечное сечение. Торможение неравномерного сверхзвукового потока газа осуществляется в сложной системе скачков уплотнения, которая имеет значительную осевую длину.

4. Расположением системы скачков уплотнения в КС и диффузоре определяются потери полного давления и соответственно максимальная степень сжатия и КПД. Использование оптимальной длины КС позволяет разместить систему скачков уплотнения в пределах цилиндрической КС и свести потери давления к минимуму.

5. Проведенные эксперименты и расчеты показали, что для эжектора с длиной цилиндрической КС, значительно меньшей оптимальной, максимальная степень сжатия при определенных коэффициентах эжекции реализуется не на предельном критическом, а на докритическом режиме.

- [3] Цегельский В.Г., Акимов М.В., Сафаргалиев Т.Д. Экспериментально-теоретическое исследование режимов работы сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 3, с. 48–58.
- [4] Yin Hai Zhu, Wenjian Cai, Changyun Wen, Yanzhong Li. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Journal Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29(5-6), pp. 989–905.
- [5] Молчанов А.М. Расчет сверхзвуковых неизобарических струй с поправками на сжимаемость в модели турбулентности. *Вестник Московского авиационного института*, 2009, т. 16, №1, с. 38–48.
- [6] Hemidi A., Henry F., Leclaire S., Seynhaeve J., Bartosiewicz Y. CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation. *Journal Applied Thermal Engineering*, 2009, no. 29, pp. 1523–1521.
- [7] Андреев Е.А., Сафаргалиев Т.Д. Экспериментальное изучение характеристик сверхзвукового газо-газового эжектора с цилиндрической камерой смешения. [Электрон. ресурс]. Москва, 2012. 1 CD-ROM.
- [8] Bartosiewicz Y., Aidoun Z., Desevaux P., Mercadier Y. CFD-experiments integration in the evaluation of six turbulence models for supersonic ejectors modeling. *Conference Proc., Integrating CFD and Experiments*, Glasgow, UK, 2003, pp. 1–10.
- [9] Hemidi A., Henry F., Leclaire S., Seynhaeve J., Bartosiewicz Y. CFD analysis of a supersonic air ejector. Part II: Relation between global operation and local flow features. *Applied Thermal Engineering*, 2009, no. 29, pp. 2990–2998.

References

- [1] Vasil'ev Iu.N. Teoriia sverkhzvukovogo gazovogo ezhektora s tsilindricheskoi kameroi smesheniia [Theory of supersonic gas ejector having a cylindrical mixing chamber]. *Lopatochnnye mashiny i struinye apparaty: sbornik statei* [Shoulder machines and inkjet devices: collection of articles]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1967, iss. 2, pp. 171–235.
- [2] Milionshchikov M.D., Riabinkov G.M. Gazovye ezhektory bol'shikh skorostei [Gas ejector at high speed]. *Sbornik rabot po issledovaniuu sverkhzvukovykh gazovykh ezhektorov: Trudy TsAGI* [Collection of papers on the study of supersonic gas ejectors: Trudy TsAGI]. Moscow, 1961, pp. 5–32.
- [3] Tsegel'skii V.G., Akimov M.V., Safargaliev T.D. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie rezhimov raboty sverkhzvukovykh gazovykh ezhektorov s tsilindricheskoi i konicheskoi kamerami smesheniia [Experimental and theoretical investigation of operating modes of supersonic gas ejectors with cylindrical and conical mixing chambers]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 3, pp. 48–58.
- [4] Yin Hai Zhu, Wenjian Cai, Changyun Wen, Yanzhong Li. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Journal Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29(5-6), pp. 989–905.
- [5] Molchanov A.M. Raschet sverkhzvukovykh neizobaricheskikh strui s popravkami na szhimaemost' v modeli turbulentsii [Calculation of supersonic non-isobaric jets with compressibility corrections in a turbulence model]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* [Herald of Moscow Aviation Institute]. 2009, vol. 16, no. 1, pp. 38–48.
- [6] Hemidi A., Henry F., Leclaire S., Seynhaeve J., Bartosiewicz Y. CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation. *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29, iss. 8-9, pp. 1523–1521.
- [7] Andreev E.A., Safargaliev T.D. Eksperimental'noe izuchenie kharakteristik sverkhzvukovogo gazo-gazovogo ezhektora s tsilindricheskoi kameroi smesheniia [Experimental study of the characteristics of a supersonic gas-gas ejector having a cylindrical mixing chamber]. Moscow, 2012. 1 CD-ROM.
- [8] Bartosiewicz Y., Aidoun Z., Desevaux P., Mercadier Y. CFD-experiments integration in the evaluation of six turbulence models for supersonic ejectors modeling. *Conference Proc., Integrating CFD and Experiments*, Glasgow, UK, 2003, pp. 1–10.

- [9] Hemidi A., Henry F., Leclair S., Seynhaeve J., Bartosiewicz Y. CFD analysis of a supersonic air ejector. Part II: Relation between global operation and local flow features. *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29, iss. 14-15, pp. 2990–2998.

Статья поступила в редакцию 31.08.2015

Информация об авторах

АКИМОВ Михаил Витальевич (Москва) — научный сотрудник НИИ ЭМ. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: 6732062@mail.ru).

САФАРГАЛИЕВ Тимур Дамирович (Москва) — инженер НИИ ЭМ. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: 6732062@mail.ru).

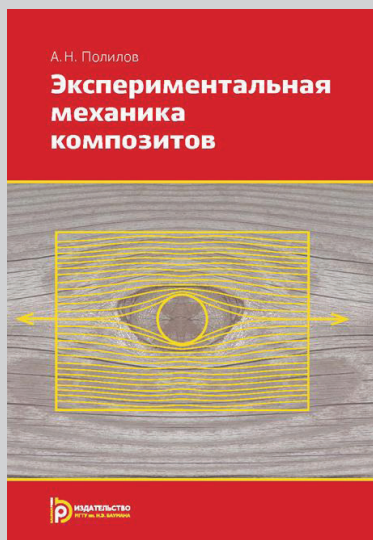
ПАПЫРИН Павел Витальевич (Москва) — инженер НИИ ЭМ. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: 6732062@mail.ru).

Information about the authors

AKIMOV Mikhail Vitalievich (Moscow) — Research Associate, Scientific and Research Institute of Power Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: 6732062@mail.ru).

SAFARGALIEV Timur Damirovich (Moscow) — Engineer, Scientific and Research Institute of Power Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: 6732062@mail.ru).

PAPYRIN Pavel Vitalievich (Moscow) — Engineer, Scientific and Research Institute of Power Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: 6732062@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
А.Н. Полилова

«Экспериментальная механика композитов»

Изложены научные основы экспериментальных исследований композитных материалов-конструкций. Обоснованы экспериментальные методы определения полного набора упругих и прочностных констант ортотропных композитов. Приведены методы исследования ползучести и высокоскоростного деформирования композитов, модели и критерии разрушения анизотропных волокнистых композитов с полимерной матрицей. Предложены энергетические критерии развития расслоений и расщеплений в композитах. Рассмотрено влияние концентрации напряжений на прочность композитных деталей. Представлены оригинальные модели разрушения композитов, а также расчетные методы, отличающиеся от стандартных.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, а также для аспирантов, инженеров, исследователей, занимающихся проблемами применения композитных материалов в различных областях специального и гражданского машиностроения.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru