

Определение области применимости аналитического метода расчета газового эжектора при различных способах замыкания системы уравнений

© А.А. Балдин, В.С. Захаров

ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Российская Федерация

Проведены анализ и сравнение двух способов замыкания системы уравнений для расчета газового эжектора. Первый способ основан на задании расходов эжектируемого и эжектирующего газов, второй — на допущении о равенстве значений статического давления эжектируемого и эжектирующего газов во входном сечении камеры смешения. Варьируемым параметром выбрана площадь поперечного сечения входа эжектируемого газа в камеру смешения. Результаты аналитических расчетов сравниваются с численным решением, по которому определяется область применимости того или иного способа замыкания. Критериями сопоставления являются коэффициент эжекции как один из главных параметров, характеризующих работу эжектора, и полное давление результирующей газовой смеси. Численное моделирование проводилось в программе ANSYS Fluent в осесимметричной постановке, модель турбулентности $k-\omega$ SST.

Ключевые слова: *газовый эжектор, аналитический метод расчета, цилиндрическая камера смешения, численное моделирование, режим запыряния, эжектирующий газ, эжектируемый газ, ANSYS Fluent, модель турбулентности, коэффициент эжекции*

Введение. Газовый эжектор — это аппарат, в котором полное давление газового потока увеличивается под действием другого, более высоконапорного потока за счет их турбулентного смешения. В настоящее время эжекторы широко применяются во многих отраслях промышленности, а также в теплоэнергетических системах. При этом остается актуальной проблема теоретического определения характеристик эжектора. Историческая справка представлена в работе [1].

Основополагающая система уравнений, основанная на законах сохранения, является незамкнутой, и требуется наличие дополнительных условий для ее замыкания. При одинаковых входных данных, но разных способах замыкания получаются отличные друг от друга значения выходных параметров. Поэтому цель данного теоретического исследования — выявление области применимости способов замыкания аналитической методики расчета газового эжектора. Для этого проведем численные эксперименты с разными геометрическими формами эжекторов и сравним результаты с результатами аналитических расчетов.

Обзор литературы. В данной работе исследуется геометрия эжектора с цилиндрической камерой смешения и кольцевым входом эжектируемого газа. В этом случае для удовлетворительного смешения

необходимо, чтобы длина камеры смешения составляла примерно 8–10 ее диаметров [2]. Однако имеются исследования [3], в которых предлагается сократить продольные габариты путем использования криволинейного входного участка.

На уменьшение длины камеры смешения можно также повлиять способами, описанными в статье [4], за счет разделения потоков на несколько струй.

При необходимости высокого потребного разрежения применение одного эжектора может оказаться недостаточным. В этом случае устанавливают дополнительные эжекторы, которые в совокупности образуют единый ступенчатый эжектор. Особенности расчета таких устройств описаны в работе [5].

Помимо газовых, существуют многофазные эжекторы, численное моделирование и экспериментальная обработка которых представлены в статьях [6, 7].

Описание аналитической методики расчета. Основополагающими уравнениями при расчете эжекторов являются законы сохранения расхода, полного импульса и полного потока энтальпии, записанные для входного и выходного сечения цилиндрической камеры смешения:

$$G_3 = G_1 + G_2; \quad (1)$$

$$G_3 w_3 - G_2 w_2 - G_1 w_1 = p_1 F_1 + p_2 F_2 - p_3 F_3; \quad (2)$$

$$G_3 T_{03} = G_1 T_{01} + G_2 T_{02}, \quad (3)$$

где G — расход газа; w — скорость газа; p — статическое давление газа; F — площадь проходного сечения; T_0 — полная температура газа. Параметры с индексом 1 относятся к эжектирующему газу во входном сечении камеры смешения, 2 — к эжектируемому газу также во входном сечении камеры смешения, 3 — к результирующей газовой смеси в конце цилиндрического участка камеры смешения (рис. 1).



Рис. 1. Геометрия эжектора:

1 — область течения эжектирующего газа; 2 — область течения эжектируемого газа; 3 — цилиндрическая камера смешения; 4 — конический диффузор; d_1 — диаметр входа эжектирующего газа в камеру смешения; d_3 — диаметр цилиндрической камеры смешения

Уравнения (1)–(3) получены с учетом следующих допущений:

- параметры течения эжектируемого и эжектирующего газа постоянны по поперечному сечению камеры смешения (задача одномерная);
- теплофизические свойства обоих газов одинаковы;
- отсутствует трение о стенку;
- отсутствует внешний и внутренний теплоподвод;
- газы подчиняются уравнению состояния.

После проведения математических преобразований, описанных в работе [2], получается система уравнений с использованием газодинамических функций:

$$\frac{T_{03}}{T_{01}} = \frac{1+n\theta}{n+1}, \quad (4)$$

$$\sqrt{(n+1)(1+n\theta)}z(\lambda_3) = z(\lambda_1) + n\sqrt{\theta}z(\lambda_2); \quad (5)$$

$$\frac{p_{03}}{p_{01}} = \frac{\sqrt{(n+1)(1+n\theta)} q(\lambda_1)}{1 + \frac{1}{\alpha} q(\lambda_3)}, \quad (6)$$

где n — коэффициент эжекции, $n = G_2/G_1$; θ — отношение полных температур эжектируемого и эжектирующего газов, $\theta = T_{02}/T_{01}$; z — приведенный импульс газа; λ — приведенная скорость газа; p_0 — полное давление газа; α — геометрический параметр эжектора, $\alpha = F_1/F_2$; q — приведенная расходонапряженность.

Входными параметрами для проведения расчета являются:

- геометрия эжектора, представленная на рис. 1;
- полные температуры эжектирующего T_{01} и эжектируемого T_{02} газов;
- полные значения давления эжектирующего p_{01} и эжектируемого p_{02} газов.

Анализируя систему уравнений (4)–(6), получаем, что число неизвестных превышает число уравнений, поэтому требуется дополнительное условие, которое позволит замкнуть систему.

В литературных источниках приводятся разные способы замыкания. Так, в источнике [2] предлагается задаваться расходами эжектируемого и эжектирующего газов, которые в общем случае неизвестны. Зададимся расходами и проведем расчет по данной методике. Примем следующие значения расхода, полного давления и температуры на входе в камеру смешения:

$$\begin{aligned} G_1 &= 25,6 \text{ кг/с}, & p_{01} &= 4 \cdot 10^6 \text{ Па}, & T_{01} &= 1000 \text{ К}, \\ G_2 &= 12,5 \text{ кг/с}, & p_{02} &= 1 \cdot 10^5 \text{ Па}, & T_{02} &= 300 \text{ К}. \end{aligned}$$

Из геометрических параметров для расчета необходимы только диаметры d_1 и d_3 , отмеченные на рис. 1. Примем следующие значения:

$$d_1 = 200 \text{ мм}, \quad d_3 = 350 \text{ мм}.$$

Для замыкания системы (4)–(6) запишем выражения для определения расходов через параметры торможения:

$$G_1 = \frac{mp_{01}F_1q(\lambda_1)}{\sqrt{T_{01}}}; \quad (7)$$

$$G_2 = \frac{mp_{02}F_2q(\lambda_2)}{\sqrt{T_{02}}}, \quad (8)$$

где m — параметр, зависящий от теплофизических свойств газа, $m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$; k — показатель адиабаты; R — универсальная газовая постоянная.

Решим систему уравнений (4)–(8). В результате решения получены значения параметров потока в конце цилиндрического участка камеры смешения.

Определим статическое давление эжектирующего и эжектируемого газов на входе в цилиндрическую камеру смешения по известным зависимостям:

$$p_1 = p_{01}\pi(\lambda_1); \quad (9)$$

$$p_2 = p_{02}\pi(\lambda_2), \quad (10)$$

где π — приведенное давление.

Найдем средневзвешенное по площади значение статического давления:

$$p_{cp} = \frac{p_1F_1 + p_2F_2}{F_1 + F_2}. \quad (11)$$

Полученное давление $p_{cp} = 6,67 \cdot 10^4$ Па. Данное значение используем для замыкания системы уравнений (4)–(6) способом, описанным в работе [8], где предлагается использовать условие равенства значений статического давления эжектируемого и эжектирующего газов в некотором сечении камеры смешения. Будем считать сечение среза сопла эжектирующего газа таковым. Тогда система (4)–(6) замыкается условием

$$p_1 = p_2 = 6,67 \cdot 10^4 \text{ Па}. \quad (12)$$

Решив систему уравнений (4)–(6), (12), пересчитаем расходы обоих газов по формулам (7) и (8).

Результаты расчетов с помощью первого и второго способа замыкания представлены в таблице.

Результаты расчета по аналитической методике

Параметр	Замыкание по [2]	Замыкание по [6]
G_1 , кг/с	25,6	28,4
G_2 , кг/с	12,5	14,1
p_{03} , Па	$0,827 \cdot 10^6$	$0,740 \cdot 10^6$
T_{03} , К	770	773
p_3 , Па	$3,83 \cdot 10^4$	$4,88 \cdot 10^4$
p_1 , Па	$5,89 \cdot 10^4$	$6,67 \cdot 10^4$
p_2 , Па	$8,05 \cdot 10^4$	$6,67 \cdot 10^4$

Как отмечалось выше, результаты этих расчетов различаются, поэтому проведем численное моделирование разных геометрических форм эжектора для дальнейшего сравнения.

Описание численной методики расчета. Численное исследование течения в камере смешения проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Полная система уравнений Навье — Стокса решается методом конечных объемов. Дискретизация по времени и пространству выполнялась со вторым порядком точности. Схема для расчета потоков на границах ячеек — AUSM [9]. Моделирование выполнялось в стационарной двумерной осесимметричной постановке. Модель среды — идеальный газ с постоянными теплофизическими свойствами. В качестве модели турбулентности была выбрана $k-w$ SST [10]. Расчетная область представлена на рис. 2.

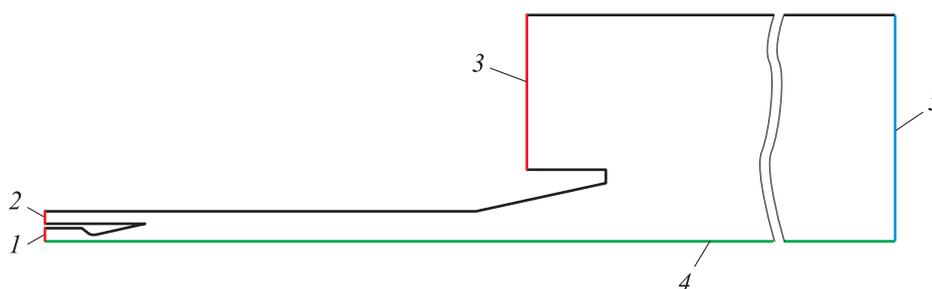


Рис. 2. Расчетная область модели:

1 — вход эжектирующего газа; 2 — вход эжектируемого газа; 3 — вход с давлением окружающей среды; 4 — выход с давлением окружающей среды; 5 — ось симметрии

На границе 1 задавались полные параметры эжектирующего газа ($p_0 = 4 \cdot 10^6$ Па, $T_0 = 1000$ К); на границе 2 — полные параметры эжектируемого газа ($p_0 = 1 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 300$ К); на границе 3 — полные

параметры, соответствующие условию атмосферы ($p_0 = 1 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 300$ К); на границе 4 — статические параметры, соответствующие условию атмосферы ($p = 1 \cdot 10^5$ Па, $T = 300$ К); на границе 5 — условие оси симметрии. На остальных границах, показанных черным цветом, задавались условия стенки.

В качестве расчетных сеток использовались структурированные сетки с общим объемом порядка 37 000 ячеек со сгущением в области пограничных слоев. Построение проводилось в программе ICEM CFD. Фрагмент сетки представлен на рис. 3.

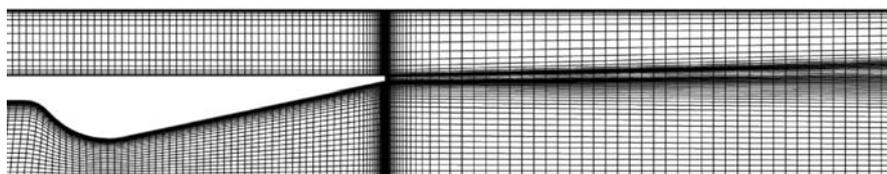


Рис. 3. Расчетная сетка входного участка цилиндрической камеры смешения эжектора

Расчеты проводились для семи геометрических форм эжекторов. Варьируемым параметром являлся диаметр цилиндрического участка камеры смешения (d_3).

Соответствие рассматриваемого диаметра d_3 цилиндрического участка камеры смешения и номера расчета представлено ниже:

Номер расчета	1	2	3	4	5	6	7
d_3 , мм	750	650	550	450	350	290	250

Обработка результатов моделирования. Параметры в конце цилиндрического участка камеры смешения (К.У) имеют сильную радиальную неравномерность (рис. 4). Поэтому для использования результатов численного моделирования необходимо провести процедуру осреднения.

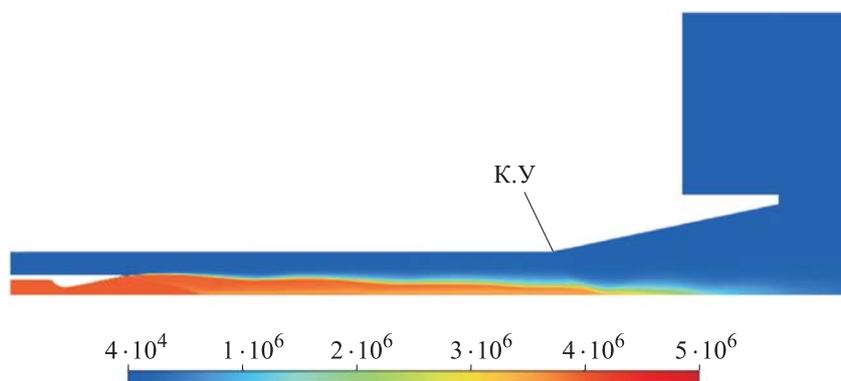


Рис. 4. Поле распределения полного давления для геометрии эжектора с $d_3 = 450$ мм

Нахождение средневзвешенных значений по площади является не единственным способом осреднения. Воспользуемся процедурой осреднения, описанной в работе [2], при которой выполняются законы сохранения расхода G , полного импульса I и полного потока энтальпии H^* . Для средних значений параметров потока должна выполняться система уравнений:

$$G = \bar{\rho}_3 \bar{w}_3 F = \text{const}; \quad (13)$$

$$I = G \bar{w}_3 + \bar{p}_3 F = \text{const}; \quad (14)$$

$$H^* = c_p \bar{T}_3 G + \frac{\bar{w}_3^2}{2} G = \text{const}; \quad (15)$$

$$\bar{p}_3 = \bar{\rho}_3 R \bar{T}_3, \quad (16)$$

где ρ — плотность газа; c_p — изобарная теплоемкость газа; черточка над параметрами означает их осредненный эквивалент.

Интегральные значения расхода, полного импульса и потока полной энтальпии в выходном сечении цилиндрической части камеры смешения найдем с помощью встроенных функций в ANSYS Fluent.

Уравнениям (13)–(16) всегда удовлетворяют два набора параметров — дозвуковые и сверхзвуковые. Для определения режима введем критерий. Этим критерием будем считать средневзвешенное по площади значение статического давления в конце цилиндрического участка камеры смешения. В зависимости от того, к какому статическому давлению (полученному в результате сверхзвукового или дозвукового решения) ближе полученное средневзвешенное значение давления, тот режим и считаем правильным.

Расчет по аналитической методике с разными способами замыкания. Проведем расчеты по рассмотренной выше аналитической методике для семи геометрических форм, ранее рассчитанных численным образом. Для расчета способом замыкания из работы [2] воспользуемся расходами, полученными при численном расчете.

Для расчета способом замыкания из работы [8] воспользуемся средневзвешенным по площади значением статического давления в сечении, совпадающем с сечением среза сопла, также взятым из численного расчета.

Так же, как и при осреднении результатов численного решения, расчет по аналитической методике дает сверхзвуковые (соответствующие запертым режимам эжекторов) и дозвуковые наборы параметров. Выбор режима соответствует выбранному для осредненных параметров численного решения.

Главными характеристиками эжектора являются степень сжатия и коэффициент эжекции. Варьируемым параметром в данной задаче

являлась геометрия эжектора, изменение которой влияло на расход эжектируемого газа. Поэтому рассмотрению подлежит только коэффициент эжекции n . Зависимость $n(\alpha)$ представлена на рис. 5.

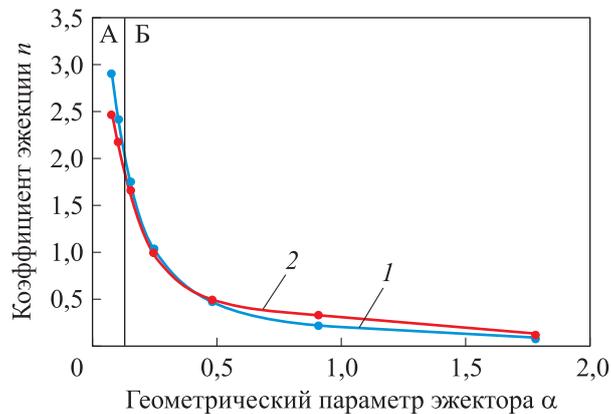


Рис. 5. Зависимость коэффициента эжекции n от геометрии эжектора α :
 А — область дозвуковых режимов; Б — область сверхзвуковых режимов;
 1 — расчет способом замыкания из [2]; 2 — расчет способом замыкания из [8]

Так как для способа замыкания из [2] расходы задавались из результатов численного моделирования, то коэффициенты эжекции для этих расчетов полностью совпадают. Рассмотрим различия значений коэффициентов эжекции между способами замыкания из [2] и [8]. Наибольшее рассогласование между ними наблюдается в левой области, соответствующей дозвуковым режимам эжектора. Объясняется это следующим: с уменьшением геометрического параметра α увеличивается площадь канала, по которому течет эжектируемый газ. Независимо от этого статическое давление в области течения эжектируемого газа превышает статическое давление эжектирующего газа. Следовательно, при нахождении средневзвешенного давления по площади для расчета способом замыкания из [8] среднее давление получается ближе к значению давления эжектируемого газа, что приводит к уменьшению точности определения расхода эжектирующего газа, а значит, и коэффициента эжекции.

График зависимости относительного отклонения полного давления в конце цилиндрического участка камеры смешения от геометрического параметра эжектора представлен на рис. 6. Величина относительного отклонения рассчитывается следующим образом:

$$\Delta_{\text{отн}} = \frac{p_{03} - p_{03}^{\text{ч}}}{p_{03}^{\text{ч}}} \cdot 100 \%, \quad (17)$$

где p_{03} — полное давление в конце цилиндрической камеры смешения, рассчитанное аналитическим способом; $p_{03}^ч$ — полное давление в конце цилиндрической камеры смешения, полученное численным способом, без учета трения.

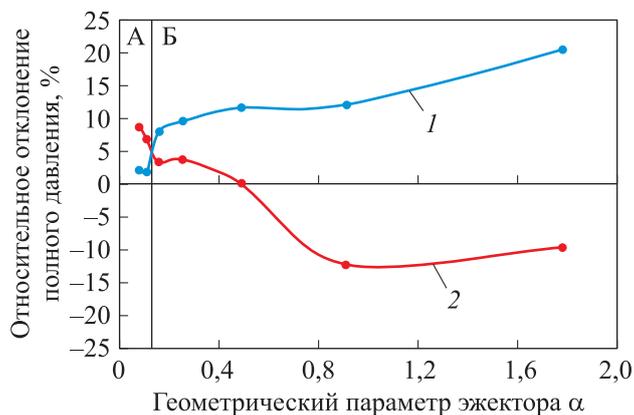


Рис. 6. Зависимость отклонения полного давления от геометрии эжектора α :
 А — область дозвуковых режимов; Б — область сверхзвуковых режимов; 1 — расчет способом замыкания из [2]; 2 — расчет способом замыкания из [8]

Приведенная на рис. 6 зависимость иллюстрирует рассогласование результатов по полному давлению в конце цилиндрического участка камеры смешения. Видно, что способ замыкания из [8] дает результат, более схожий с численным моделированием для запертых эжекторов, однако для геометрии с $\alpha > 0,6$ расхождение становится значительным для обоих способов замыкания.

На начальном участке данной зависимости первые две точки, как отмечалось выше, соответствуют дозвуковому режиму эжектора. Для таких эжекторов способ замыкания из [2] дает более точное согласование с численным моделированием, чем способ замыкания из [8].

Заключение. По результатам исследования можно сделать выводы об области применимости способов замыкания системы уравнений (4)–(6). Для расчета дозвукового эжектора предлагается использовать способ замыкания, основанный на задании расходов эжектируемого и эжектирующего газов. Для сверхзвуковых эжекторов лучше с результирующими согласуются параметры, полученные при использовании способа замыкания, основанного на допущении о равенстве значений статического давления обоих газов во входном сечении камеры смешения. При $\alpha > 0,6$ оба способа замыкания становятся неработоспособными. Поэтому в данной области рекомендуется использовать численное моделирование.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аркадов Ю.К. *Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы*. Москва, Физматлит, 2001, 336 с.
- [2] Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика*. 3-е изд. Москва, Наука, 1969, 824 с.
- [3] Сыченков В.А., Панченко В.И., Халиулин Р.Р., Сыченкова Е.В. Исследование характеристик кольцевых эжекторов и эжекторов с криволинейным входом. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 2013, № 2-2, с. 56–59.
- [4] Сыченков В.А., Панченко В.И., Халиулин Р.Р. Исследование коаксиального газового эжектора. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2014, № 2, с. 24–28.
- [5] Александров В.Ю., Климовский К.К. *Оптимальные эжекторы*. Москва, Машиностроение, 2012, 133 с.
- [6] Лепешинский И.А., Заранкевич И.А., Казэннов И.С. Численное и экспериментальное моделирование двухфазного жидкостно-газового эжектора. *Материалы XX Юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам*. Москва, Изд-во МАИ-Принт, 2017, с. 492–494.
- [7] Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование жидкостно-газового двухфазного эжектора со сверхзвуковым профилированным соплом. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2017, т. 16, № 2, с. 164–171.
- [8] Миллионщиков М.Д., Рябников Г.М. Газовые эжекторы больших скоростей. *Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов*. Москва, Изд-во ЦАГИ, 1961, с. 5–32.
- [9] Liou M.S., Steffen C.J., Jr. A new flux splitting scheme. *Journal of Computational Physics*, 1993, vol. 107, no. 1, pp. 23–39.
- [10] Белов И.А., Исаев С.А. *Моделирование турбулентных течений*. Санкт-Петербург, Изд-во Балтийского государственного технического университета, 2001, 109 с.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Балдин А.А., Захаров В.С. Определение области применимости аналитического метода расчета газового эжектора при различных способах замыкания системы уравнений. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 8. EDN PCLFEA

Балдин Алексей Александрович — инженер отдела «Аэрокосмические двигатели» ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова, студент кафедры «Ракетные двигатели» факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: aabaldin@ciam.ru

Захаров Вячеслав Сергеевич — начальник сектора расчетно-теоретических и обликковых исследований отдела «Аэрокосмические двигатели» ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова. e-mail: vszakharov@ciam.ru

Determining the applicability range for an analytical method of computing gas ejector with different techniques in closing the system of equations

© A.A. Baldin, V.S. Zakharov

Central Institute of Aviation Motors, CIAM,
Moscow, 111116, Russian Federation

The paper presents results of analyzing and comparing two methods in closing the system of equations for computation of a gas ejector. The first method is based on setting flow rates of the ejected and ejecting gases, the second — on an assumption of equality of the ejected and ejecting gases static pressures in the mixing chamber inlet section. The cross-sectional area of the ejected gas inlet to the mixing chamber is selected as the variable parameter. Analytical computation results are compared with a numerical solution making it possible to determine applicability range of a particular closing technique. The comparison criteria include the ejection coefficient as one of the main parameters characterizing the ejector operation, and the total pressure of the resulting gas mixture. Numerical simulation is performed in the ANSYS Fluent in the axisymmetric formulation. Turbulence model is $k-\omega$ SST.

Keywords: gas ejector, analytical computation method, cylindrical mixing chamber, numerical simulation, locking mode, ejecting gas, ejected gas, ANSYS Fluent, turbulence model, the ejection coefficient

REFERENCES

- [1] Arkadov Yu.K. *Novye gazovye ezhektory i ezheksionnye protsessy* [New gas ejectors and ejection processes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 336 p.
- [2] Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika*. [Applied gas dynamics]. 3rd ed. Moscow, Nauka Publ., 1969, 824 p.
- [3] Sychenkov V.A., Panchenko V.I., Khaliulin R.R., Sychenkova E.V. *Issledovanie kharakteristik koltsevykh ezhektorov i ezhektorov s krivolineynym vkhodom* [Study of characteristics of annular ejectors and ejectors with a curved inlet]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: sbornik dokladov* [International scientific and technical conference: collection of papers]. Kazan, Kazanskiy Natsionalnyi Issledovatel'skiy Universitet im. A.N. Tupoleva Publ., 2013, pp. 365–369.
- [4] Sychenkov V.A., Panchenko V.I., Khaliulin R.R. *Issledovanie koaksialnogo gazovogo ezhektora* [Study of the coaxial gas ejector]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2014, no. 2, pp. 24–28.
- [5] Alexandrov V.Yu., Klimovsky K.K. *Optimalnye ezhektory* [Optimal ejectors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, 133 p.
- [6] Lepeshinsky I.A., Barankevich I.A., Kazennov I.S. *Chislennoe i eksperimentalnoe modelirovanie dvukhfazovogo zhidkostno-gazovogo ezhektora* [Numerical and experimental simulation of the two-phase liquid-gas ejector]. In: *XX Yubileynaya mezhdunarodnaya konferentsiya po vychislitel'noy mekhanike i sovremennym prikladnym sistemam* [XX Anniversary International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Systems]. Moscow, MAI-Print Publ., 2017, pp. 492–494.

- [7] Lepeshinsky I.A., Reshetnikov V.A. Zankevich I.A. Chislennoe modelirovanie i eksperimentalnoe issledovanie zhidkostno-gazovogo dvukhfazovogo ezhektora so sverkhzvukovym profilirovannym soplom [Numerical modeling and experimental research of a two-phase liquid-gas ejector with a profiled supersonic nozzle]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 164–171.
- [8] Millionshchikov M.D., Ryabnikov G.M. Gazovye ezhektory bolshikh skorostey [High-speed gas ejectors]. In: *Sbornik rabot po issledovaniyu sverkhzvukovykh gazovykh ezhektorov* [Collection of papers on the study of supersonic gas ejectors]. Moscow, TsAGI Publ., 1961, pp. 5–32.
- [9] Liou M. S., Steffen C. J., Jr. A new flux splitting scheme. *Journal of Computational Physics*, 1993, vol. 107, no. 1, pp. 23–39.
- [10] Belov I. A., Isaev S. A. *Modelirovanie turbulentnykh techeniy* [Modeling the turbulent flows]. St. Petersburg, Baltiyskiy Gosudarstvennyi Tekhnicheskiy Universitet Publ., 2001, 109 p.

Baldin A.A., Engineer, Department of Aerospace Engines, Central Institute of Aviation Motors, CIAM; Student, Department of Rocket Engines, Faculty of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: aabaldin@ciam.ru

Zakharov V.S., Head of the Sector of Computational, Theoretical and Appearance Research, Department of Aerospace Engines, Central Institute of Aviation Motors, CIAM. e-mail: vszakharov@ciam.ru