

УДК 533.6.07

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-475-485

Для цитирования: Кузнецов В. И., Макаров В. В. Метод расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 3. С. 475–485. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-475-485.

For citation: Kuznetsov V. I., Makarov V. V. [Method for calculating the thermodynamic characteristics of a vortex ejector with known geometric dimensions]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 3, P. 475–485. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-475-485.

Метод расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах

В. И. Кузнецов, В. В. Макаров

Омский государственный технический университет
Российская Федерация, 644050, г. Омск, просп. Мира, 11
E-mail: vvmakarov@omgtu.tech

На базе составленной ранее физико-математической модели рабочего процесса вихревого эжектора было произведено ее решение. Решение этой модели позволило составить две методики расчета: методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора для заданных термодинамических характеристик и методика расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах [1; 2].

Во многих областях аэрокосмической техники применяют вихревые эжекторы. Составленная разработка метода расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах позволит более широко применять вихревые эжекторы в аэрокосмической промышленности. В основе методики расчета лежат понятия о касательных напряжениях, возникающих в вязкой среде, при взаимодействии двух потоков, движущихся с разными скоростями.

Показан механизм передачи кинетической энергии от высокоэнергетического газа к низкоэнергетическому.

Ключевые слова: вихревой эжектор, вязкость, касательные напряжения, градиент скоростей, термодинамические характеристики.

Method for calculating the thermodynamic characteristics of a vortex ejector with known geometric dimensions

V. I. Kuznetsov, V. V. Makarov

Omsk State Technical University
11, Mira Av., Omsk, 644050, Russian Federation
E-mail: vvmakarov@omgtu.tech

Based on the previously compiled physical and mathematical model of the vortex ejector workflow, its solution was made. The solution of this model made it possible to compile two calculation methods: a method for calculating the optimal geometry of a vortex ejector for given thermodynamic characteristics and a method for calculating the thermodynamic characteristics of a vortex ejector with known geometric dimensions [1; 2].

Vortex ejectors are used in many areas of aerospace engineering. The compiled development of a method for calculating the thermodynamic characteristics of a vortex ejector with known geometric

dimensions will make it possible to use vortex ejectors more widely in the aerospace industry. The calculation method is based on the concepts of tangential stresses arising in a viscous medium when two flows moving at different speeds interact.

The mechanism of kinetic energy transfer from a high-energy gas to a low-energy one is shown.

Keywords: vortex ejector, viscosity, tangential stresses, velocity gradient, thermodynamic characteristics.

Введение

Вихревой эжектор (вихревой компрессор) – простейшая и распространенная газодинамическое устройство, применяемое в разнообразных отраслях промышленности, в вакуумной технике, авиа- и ракетостроении и различных экспериментальных аэродинамических установках. Эжектор – устройство, в котором полная энергия одного потока увеличивается за счет передачи энергии от другого потока, имеющего более высокую энергию. В результате взаимодействия потоков на выходе из эжектора образуется смесь, имеющая полное давление выше полного давления низкоэнергетического газа, но ниже полного давления высокоэнергетического газа.

Основным достоинством вихревого эжектора является отсутствие движущихся деталей, что существенно при работе с агрессивными либо горячими средами.

Постановка задачи

Многие области техники применяют вихревые эжекторы. Создание замкнутой математической модели, описывающей рабочий процесс вихревого эжектора, дало возможность разработать методику расчета оптимальной геометрии при заданных термодинамических параметрах. Основной задачей данной работы является попытка создать методику расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах.

Материал и методы исследования

Методика расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах основаны на решении математической модели. Математическая модель имеет следующий вид [2]: сумма энергий эжектирующего и эжектируемого газов равна энергии газа, выходящего из вихревого эжектора (рис. 1):

$$N_1 + N_2 = N_3, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где

$$N_1 = G_1 \cdot L_1, \text{ Вт}; \quad (2)$$

N_1 – энергия эжектирующего газа, Вт; G_1 – расход эжектирующего газа, кг/с; L_1 – удельная энергия эжектирующего газа, Дж/кг:

$$L_1 = c_p \cdot T_{01} \left(1 - \frac{1}{\pi_{p1}^* \frac{k-1}{k}} \right) \cdot \eta_p^*, \quad (3)$$

где π_{p1}^* – степень понижения полного давления эжектирующего газа:

$$\left(\pi_{p01}^* = P_{01}/P_{03} \right); \quad (4)$$

T_{01} – полная температура эжектирующего газа, К; c_p – теплоемкость при постоянном давлении (Дж/(кг*К)); η_p^* – КПД процесса расширения эжектирующего газа (берется на базе последних достижений турбостроения, $\eta_p^* = 0,92-0,94$);

$$N_2 = G_2 \cdot L_2, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где G_2 – расход эжектируемого газа, кг/с; L_2 – удельная энергия эжектируемого газа, Дж/кг;

$$L_2 = c_p T_{02} \left(\pi_c^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c^*}, \quad (6)$$

где π_c^* – степень повышения полного давления эжектируемого газа за счет энергообмена силами вязкости с эжектирующим газом:

$$\pi_c^* = P_{03} / P_H; \quad (7)$$

T_{02} – полная температура эжектируемого газа, К; P_{03} – полное давление смеси газов на выходе из вихревого эжектора, Па; P_H – давление среды, откуда поступает эжектируемый газ, Па; η_c^* – коэффициент полезного действия процесса сжатия эжектируемого газа (берется на базе последних достижений компрессоростроения, $\eta_c^* = 0,85-0,87$).

Полная энергия смеси газов на выходе из вихревого эжектора

$$N_3 = G_3 \cdot L_3, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где G_3 – расход газа на выходе из вихревого эжектора, кг/с; L_3 – удельная энергия смеси газов на выходе из вихревого эжектора, Дж/кг:

$$L_3 = c_p T_{03} \left(1 - 1 / \pi_{P3}^{*\frac{k-1}{k}} \right) \eta_P^*; \quad (9)$$

где π_{P3}^* – степень понижения полного давления смеси газов на выходе из вихревого эжектора;

$$\pi_{P3}^* = P_{03} / P_H; \quad (10)$$

T_{03} – полная температура газа на выходе из вихревого эжектора, К; η_{P3}^* – КПД процесса расширения смеси газов на выходе из эжектора; K – показатель адиабаты.

Связь между расходами эжектирующего, эжектируемого и смеси газов на выходе из вихревого эжектора

$$G_1 + G_2 = G_3, \text{ кг/с}. \quad (11)$$

Степень эжекции определяется уравнением

$$\Pi = \frac{G_2}{G_1}. \quad (12)$$

Тепловой поток, идущий от более нагретого компонента к менее нагретому, определяется функциональной зависимостью [3]

$$Q = f(T_G - T_X), \quad (13)$$

где T_G , T_X – статические температуры более и менее нагретых компонентов соответственно, К.

Касательные напряжения, за счет которых передается кинетическая энергия от высокоэнергетического к низкоэнергетическому компоненту, определяется выражением [4]

$$\tau = P_{01} - P_{03}, \text{ Па}. \quad (14)$$

Касательные напряжения могут быть определены и по другому уравнению [4; 5]

$$\tau = \rho \lambda \frac{l V^2}{d 2}, \text{ Па}, \quad (15)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³; l – длина пути взаимодействия высоко- и низкоэнергетического компонентов, м; d – эквивалентный диаметр, м; V – скорость движения потока, м/с; $\lambda = f(\text{Re})$ – коэффициент сопротивления трения; Re – число Рейнольдса.

Система уравнений (1)–(11) является математической моделью, описывающей рабочий процесс вихревого эжектора.

Производится решение математической модели для определения термодинамических параметров смеси газов на выходе из вихревого эжектора.

Формулы (2)–(10) подставляются в уравнения (1):

$$\begin{aligned} G_1 c_p T_{01} \left[1 - \left(P_{03} / P_{01} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_p^* + G_2 c_p T_{02} \left[\left(P_{03} / P_H \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_c^*} = \\ = G_3 c_p T_{03} \left[1 - \left(P_H / P_{03} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_p^*. \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнение (15) является уравнением энергии газа в механической форме. В тепловой форме это уравнение имеет вид [6–8]

$$G_1 i_{01} + G_2 i_{02} = G_3 i_{03}, \quad (17)$$

где $i_{0j} = c_{pj} T_{0j}$ – полная энтальпия газа, Дж/кг; c_{pj} – теплоемкость при постоянном давлении j -го газа, Дж/(кг*К); T_{0j} – полная температура j -го газа, К; $j = 1 \div 3$ – параметры газа на входе эжектирующего газа, эжектируемого газа и на выходе из вихревого эжектора соответственно.

При $c_{pj} = c_p = \text{const}$ и $G_2 / G_1 = \Pi$ уравнение (17) преобразуется к виду

$$(\Pi + 1) \frac{T_{03}}{T_{01}} = 1 + \Pi \frac{T_{02}}{T_{01}}. \quad (18)$$

Полные температуры эжектирующего и эжектируемого газов на входе в эжектор в частном случае могут иметь одну и ту же температуру, т. е. $T_{01} = T_{02}$. Тогда из уравнения энергии в тепловой форме (18) следует, что

$$T_{01} = T_{02} = T_{03}. \quad (19)$$

С учетом уравнения (19), уравнение энергии в механической форме (15) можно преобразовать следующим образом:

$$\left[1 - \left(\frac{P_{03}}{P_{01}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_p^* + \Pi \left[\left(\frac{P_{03}}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_c^*} = (\Pi + 1) \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_{03}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_p^*. \quad (20)$$

В уравнении (20) одна неизвестная величина. Это полное давление газа на выходе из вихревого эжектора P_{03} .

Определение полного давления газа на выходе из вихревого эжектора осуществляется раскрытием скобок уравнения (20):

$$\eta_p^* - \frac{\eta_p^*}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} P_{03}^{\frac{k-1}{k}} + \frac{\Pi}{\eta_c^*} \frac{1}{P_H^{\frac{k-1}{k}}} P_{03}^{\frac{k-1}{k}} - \frac{\Pi}{\eta_c^*} = (\Pi + 1) \eta_p^* - (\Pi + 1) \eta_p^* P_H^{\frac{k-1}{k}} \frac{1}{P_{03}^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (21)$$

После умножения всех членов на величину $P_{03}^{\frac{k-1}{k}}$ уравнение (21) приводится к виду

$$\left(\frac{\eta_p^*}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\Pi}{\eta_c^*} \frac{1}{P_H^{\frac{k-1}{k}}} \right) P_{03}^{2 \frac{k-1}{k}} + \Pi \left(\frac{1}{\eta_c^*} + \eta_p^* \right) P_{03}^{\frac{k-1}{k}} = (\Pi + 1) \eta_p^* P_H^{\frac{k-1}{k}}. \quad (22)$$

Уравнение (22) преобразовывается к виду

$$ax^2 + bx - c = 0, \quad (23)$$

где $a = \frac{\eta_P^*}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\Pi}{\eta_C^*} \cdot \frac{1}{P_H^{\frac{k-1}{k}}}$; $b = \Pi \left(\frac{1}{\eta_C^*} + \eta_P^* \right)$; $c = (\Pi + 1) \eta_C^* P_H^{\frac{k-1}{k}}$; $x = P_{03}^{\frac{k-1}{k}}$.

Полное давление газа на выходе из вихревого эжектора находится из решения квадратного уравнения (23):

$$P_{03} = x^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (24)$$

В уравнении (24) знак плюс перед корнем квадратным взят потому, что полное давление газа на выходе из эжектора не может иметь отрицательное значение.

На входе в вихревой эжектор скорости эжектирующего и эжектируемого газов имеют различные значения. В вязкой жидкости за счет разности скоростей возникают касательные напряжения, приводящие к снижению скорости высоконапорного газа и к повышению скорости низконапорного газа. Следовательно, силами вязкости кинетическая энергия передается от высоконапорного газа к низконапорному [1]. Таким образом, высоконапорный газ совершает работу над низконапорным газом, в результате чего полное давление высоконапорного газа падает, низконапорного – растет. Обмен работой приводит и к изменению полной температуры газа. Полная температура высоконапорного газа падает, низконапорного – растет [1; 9; 10].

Изменение полных температур высоконапорного и низконапорного газов можно определить с помощью уравнений термодинамики [10; 11]

$$T_{01P} = T_{01} \left[1 - \left(1 - 1 / \pi_{T1}^* \right)^{\frac{k-1}{k}} \eta_P^* \right], \quad (25)$$

$$T_{02C} = T_{02} \left[\left(\pi_C^* \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_C^*} + 1, \quad (26)$$

где T_{01P} – полная температура высоконапорного газа после завершения обмена работой с низконапорным газом, К; T_{02C} – полная температура низконапорного газа после обмена работой с высоконапорным газом, К.

Обмен работой заканчивается тогда, когда полное давление высоконапорного и низконапорного газов будут равны полному давлению их смеси на выходе из вихревого эжектора, т. е. P_{03} .

В процессе обмена работой может оказаться, что статическая температура одного газа будет выше статической температуры другого. В результате возникает тепловой поток, идущий от потока с более высокой статической температурой к потоку с пониженной статической температурой,

$$Q = f(\Delta t) = f(T_T - T_X). \quad (27)$$

Тепловой поток и температуру T_{03} на выходе из вихревого эжектора можно определить по формулам теории теплопередач или по формуле (18).

Вышеприведенная математическая модель замкнута. На базе решения этой модели можно составить методику расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических параметрах.

Методика расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических параметрах

Исходные данные для расчета:

P_{01} – полное давление на входе в эжектор высоконапорного газа, Па;

T_{01} – полная температура высоконапорного газа на входе в вихревой эжектор, К;

F_1 – площадь входа в вихревой эжектор высоконапорного газа, м²;

P_{02} – полное давление низконапорного газа на входе в вихревой эжектор, Па;

T_{02} – полная температура низконапорного газа на входе в вихревой эжектор, К;

F_2 – площадь входа в эжектор низконапорного газа, м²;

F_3 – площадь выхода из вихревого эжектора смеси газов, м²;

k – показатель адиабаты газа;

P_H – давление окружающей среды, Па;

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{Дж}} \right)^{0,5}};$$

$m = 0,0404$ – для воздуха;

$m = 0,0396$ – для продуктов сгорания керосина;

η_p^* – КПД процесса расширения газа (берется на базе последних достижений турбиностроения);

η_c^* – КПД процесса сжатия газа (берется на базе последних достижений компрессоростроения).

Определить:

P_{03} – полное давление газа на выходе из вихревого эжектора, Па;

Π – степень эжекции $\left(\Pi = \frac{G_2}{G_1} \right)$;

G_2 – расход низконапорного газа на входе в вихревой эжектор, кг/с;

G_3 – расход газа на выходе из вихревого эжектора, кг/с;

G_1 – расход высоконапорного газа на входе в вихревой эжектор, кг/с;

T_{03} – полная температура газа на выходе из вихревого эжектора, К.

Порядок расчета

1. Газодинамическая функция давления высоконапорного газа на входе в вихревой эжектор

$$\pi(\lambda_1) = \frac{P_H}{P_{01}}.$$

2. Коэффициент скорости высоконапорного газа на входе в вихревой эжектор

$$\lambda_1 = \sqrt{\left[1 - \pi(\lambda_1)^{\frac{k-1}{k}} \right] \frac{k+1}{k-1}}.$$

3. Приведенный расход

$$q(\lambda_1) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_1 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right)^{\frac{1}{k-1}},$$

где $q(\lambda_1) = 1$ при $P_{01} / P_H \geq 1,89$.

4. Расход высоконапорного газа на входе в вихревой эжектор

$$G_1 = m \frac{F_1 P_{01} q(\lambda_1)}{\sqrt{T_{01}}}, \text{ кг/с.}$$

5. Расход газа на выходе из вихревого эжектора определяется точкой пересечения графиков $G_3 = f(\Pi)$ и $G_3 = f(\Pi P_{03})$.

Расчет этих графиков осуществляется, как показано далее.

6. Определение коэффициента a для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П:

$$a_i = \frac{\eta_P}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} - \Pi_i \frac{1}{\eta_C^* P_H^{\frac{k-1}{k}}},$$

где $i = 1 \div 5$.

7. Определение коэффициента b для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П:

$$b_i = \Pi_i \left(\frac{1}{\eta_C^*} + \eta_P^* \right),$$

где $i = 1 \div 5$.

8. Определение коэффициента c для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П:

$$c = (\Pi_i + 1) \eta_P^* P_H^{\frac{k-1}{k}},$$

где $i = 1 \div 5$.

9. Определение полного давления газа на выходе из вихревого эжектора для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П:

$$P_{03i} = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где $i = 1 \div 5$.

10. Газодинамическая функция давления газа на выходе из вихревого эжектора для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П:

$$\pi(\lambda_3)_i = \frac{P_H}{P_{03i}},$$

где $i = 1 \div 5$.

11. Коэффициент скорости газа на выходе из вихревого эжектора для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П:

$$\lambda_{3i} = \sqrt{\left[1 - \pi(\lambda_3)_i^{\frac{k-1}{k}} \right] \frac{k+1}{k-1}},$$

где $i = 1 \div 5$.

12. Приведенный расход газа на выходе из вихревого эжектора для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П:

$$q(\lambda_{3i}) = \lambda_{3i} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{3i}^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}},$$

где $i = 1 \div 5$.

13. Расход газа на выходе из вихревого эжектора для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П в функции полного давления и степени эжекции П:

$$G_3 = f(P_{03i}, \Pi_i) = m \frac{F_3 P_{03i} q(\lambda_3)_i}{\sqrt{T_{03}}}, \text{ кг/с}$$

где $i = 1 \div 5$.

14. Расход газа на выходе из вихревого эжектора для $i^{\text{ого}}$ количества степеней эжекции П в функции от степени эжекции П:

$$G_{3i} = (\Pi_i + 1) G_1, \text{ кг/с},$$

где $i = 1 \div 5$.

15. Строятся графики $G_{3i} = f(P_{03i}, \Pi_i)$ и $G_{3i} = f(\Pi_i)$ (рис. 1).

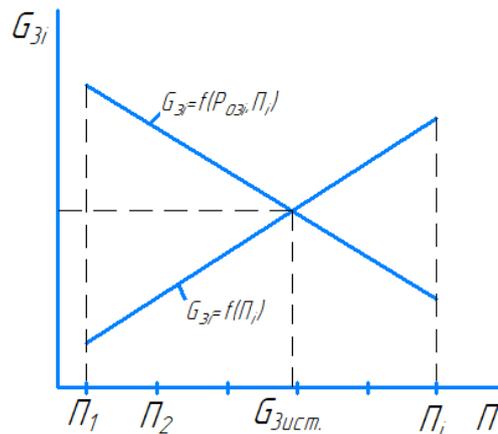


Рис. 1. График изменения расхода газа на выходе из вихревого эжектора в зависимости от степени эжекции Π_i и в функции от (P_{03i}, Π_i)

Fig. 1. Graph of the gas flow rate at the outlet of the vortex ejector depending on the degree of ejection Π_i and as a function of (P_{03i}, Π_i)

Точка пересечения двух графиков дает истинное значение степени эжекции и полного давления газа на выходе из вихревого эжектора.

16. Полная температура газа на выходе из вихревого эжектора

$$T_{03} = \frac{T_{01}}{\Pi + 1} \left(1 + \Pi \frac{T_{02}}{T_{01}} \right).$$

Расчет окончен.

Обсуждение результатов

Вышеприведенное исследование показало, что в вихревом эжекторе обмен работы и теплоты происходит под действием сил вязкости, вызывающих возникновение касательных напряжений. Теплообмен между слоями газа идет за счет разности статических температур высоконапорного и низконапорного компонентов.

Касательные напряжения в вихревом эжекторе появляются из-за разности угловых скоростей высоконапорного и низконапорного газов.

Процесс сжатия и расширения низконапорного и высоконапорного газов описывается известными уравнениями механики сплошной среды [12].

На базе разработанной замкнутой математической модели составлена методика расчета термодинамических параметров вихревого эжектора при известных геометрических размерах.

Совпадения теоретических и расчетных данных удовлетворительны (рис. 2–5) [13; 14].

Заключение

Методика расчета термодинамических параметров вихревого эжектора составлена на базе математической модели, описывающей рабочий процесс вихревого эжектора с помощью уравнений механики сплошной среды.

Изменение полного давления и полной температуры объясняется обменом работой и теплотой между высоконапорным и низконапорным потоками газа. Механизмом передачи кинетической энергии от высоконапорного к низконапорному газу являются силы вязкости, возникающей за счет разности угловых скоростей.

Тепловой поток возникает из-за разницы статических температур высоконапорного и низконапорного газов.

Совпадение расчетных данных, определенных по вышеприведенной методике, с экспериментами других авторов удовлетворительное.

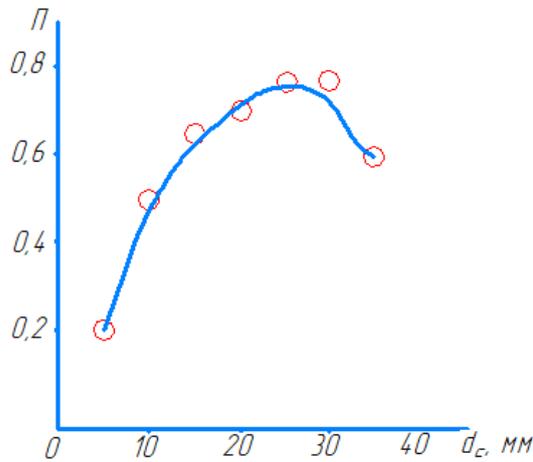


Рис. 2. Влияние диаметра сопла эжектирующего потока на степень эжекции
(— расчет; ○ – эксперимент)

Fig. 2. The effect of the ejecting flow nozzle on the degree of ejection
(— calculation; ○ – experiment)

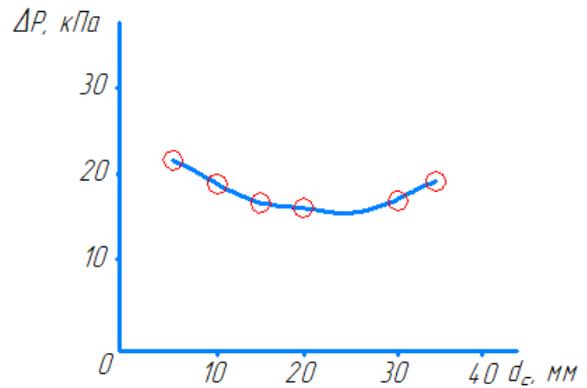


Рис. 3. Влияние диаметра сопла для ввода эжектируемого газа на повышение его давления
(— расчет; ○ – эксперимент)

Fig. 3. The effect of the nozzle diameter for the injection of the ejected gas on the increase in its pressure
(— calculation; ○ – experiment)

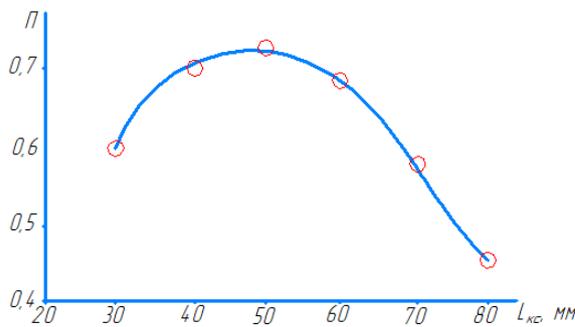


Рис. 4. Влияние длины камеры смешения на коэффициент эжекции
(— расчет; ○ – эксперимент)

Fig. 4. The effect of the mixing chamber length on the ejection coefficient
(— calculation; ○ – experiment)

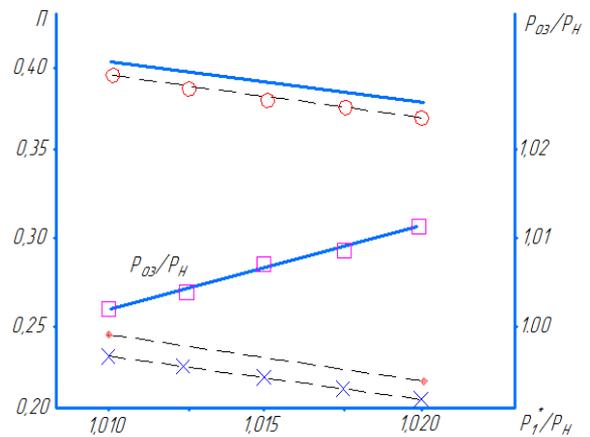


Рис. 5. Зависимость коэффициента эжекции Π и полного давления P_{03} на выходе из вихревого эжектора от конструкции сопла активного потока и полного давления высоконапорного газа от полного давления на входе в вихревой эжектор
(○ – сопло с вихревой струей; × – сопло с равномерным полем скоростей)

Fig. 5. Dependence of the ejection coefficient Π and the total pressure at the outlet of the vortex ejector on the design of the active flow nozzle and the total pressure of the high-pressure gas on the total pressure at the inlet of the vortex ejector (○ – vortex jet nozzle; × – nozzle with uniform velocity field)

Библиографические ссылки

1. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Метод расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах // Решетневские чтения. 2021. С. 203–204.
2. Кузнецов В. И., Макаров В. В., Шандер А. Ю. Физико-математическая модель рабочего процесса струйного эжектора // Омский науч. вестник. Авиационно-ракетное и энергетич. машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 78–87.
3. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Теория, эксперимент, численное моделирование // Сб. науч. тр. SWORLD (научные труды Sworld). 2013. Т. 3, № 3. С. 79–99.
4. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск : Наука, 1984. 302 с.
5. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Теория, эксперимент, численное моделирование // Машиноведение и машиностроение. 2013. 412 с.
6. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Эффект Ранка: Эксперимент, теория, расчет : моногр. М. : Инновационное машиностроение. 2017. 376 с.
7. Rostami zadeh E. Majd A., Arbabian S. Effects of Electromagnetig Fields on Seed Germination in Urtica Dioical // International journal of scientific & Technology Research. 2014. Vol. 3, Is. 4. P. 365–368.
8. К вопросу выбора эжектора системы очистки воздуха танков с двухтактными двигателями / В. Ф. Климов, Л. К. Магерамов и др. // Интегрирование технологии и энергосбережение. 2014. № 3. С. 125–129.
9. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876. P. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845.
10. Sankar, Lakshmi N. Three – Dimensional Navier – Stoces Fuli – Potantional Coupled Analysis for Viscous Transonic Flow // AIAA Journal. 1993. Vol. 31(10). P. 1857–1864. DOI: 10.2514/3. 11859.
11. Quemard C., Mignosi A., Seraudie A. Studies Relative to an Induction Pressurized Transonic Wind Tunnel. A: Air Pump Perfomance: Circuit Losses. Nasa TTF-16, 187. Washington D. C. 1975. 27 p.
12. Красков Н. Ф., Кошевой В. Н., Калугин В. Т. Аэродинамика отрывных течений. М. : Высшая школа. 1988. 351 с.
13. Кузнецов В. И., Якимушкин Р. В., Шербергерн А. Ю. Результаты сравнительных испытаний охладителя наддувочного воздуха комбинированного дизеля // Техника и технологии транспорта : сб. науч. ст. 2019. № 4 (42), Ч. 2. С. 131–140.
14. Халиулин Р. Р., Сыченков В. А., Панченко В. И. Разработка методики расчета эжекторов с малыми коэффициентами эжекции // Известия вузов. Авиационная техника. 2018. № 1. С. 65–70.

References

1. Kuznetsov V. I., Makarov V. V. [Method for calculating the thermodynamic characteristics of a vortex ejector with known geometric dimensions]. *Reshetnevskie chteniya*. 2021. P. 203–204 (In Russ.).
2. Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shander A. Yu. [Physico-mathematical model of the jet ejector workflow]. *Omskiy nauch. vestnik. Aviatsionno-raketnoe i energetich. mashinostroenie*. 2021, Vol. 5, No. 3, P. 78–87 (In Russ.).
3. Piralishvili S. A. [Vortex effect. Theory, experiment, numerical modeling]. *Sb. nauch. tr. SWORLD (nauchnye trudy Sworld)*. 2013, Vol. 3, No. 3, P. 79–99 (In Russ.).
4. Kutateladze S. S., Nakoryakov V. E. *Teplomassoobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh* [Heat and mass transfer and waves in gas-liquid systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984, 302 p.
5. Piralishvili S. A. [Vortex effect. Theory, experiment, numerical modeling]. *Mashinovedenie i mashinostroenie*. 2013, 412 p.

6. Kuznetsov V. I., Makarov V. V. *Effekt Ranka: Eksperiment, teoriya, raschet* [The Rank effect: Experiment, theory, calculation]. Moscow, Innovative Mechanical Engineering Publ., 2017, 376 p.
7. Rostami zadeh E. Majd A., Arbabian S. Effects of Electromagnetig Fields on Seed Germination in *Urtica Dioical*. *International journal of scientific & Technology Research*. 2014, Vol. 3, Is. 4, P. 365–368.
8. Klimov V. F., Mageramov L. K. et al. [To the question of choosing an ejector for the air purification system of tanks with two-stroke engines]. *Integrirovanie tekhnologii i energosberezhenie*. 2014, No. 3, P. 125–129 (In Russ.).
9. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *AIP Conference Proceedings*. 2017, Vol. 1876, P. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845.
10. Sankar, Lakshmi N. Three – Dimensional Navier – Stoces Fuli – Potantional Coupled Analysis for Viscous Transonic Flow. *AIAA Journal*. 1993, Vol. 31(10), P. 1857–1864. DOI: 10.2514/3. 11859.
11. Quemard C., Mignosi A., Seraudie A. Studies Relative to an Induction Pressurized Transonic Wind Tunnel. A: Air Pump Perfomance: Circuit Losses. Nasa TTF-16, 187. Washington D. C. 1975, 27 p.
12. Krasnov N. F., Koshevoy V. N., Kalugin V. T. *Aerodinamika otryvnykh techeniy* [Aerodynamics of breakaway flows]. Moscow, High school Publ., 1988, 351 p.
13. Kuznetsov V. I., Yakimushkin R. V., Sherbergern A. Yu. [Results of comparative tests of a combined diesel charge air cooler]. *Tekhnika i tekhnologii transporta*. 2019, No. 4 (42), Part 2, P. 131–140 (In Russ.).
14. Khaliullin R. R., Sychenkov V. A., Panchenko V. I. [Development of methods for calculating ejectors with small ejection coefficients]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*. 2018, No. 1, P. 65–70.

© Кузнецов В. И., Макаров В. В., 2022

Кузнецов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры авиа- и ракетостроения; Омский государственный технический университет. E-mail: vik.kuznetzov@yandex.ru.

Макаров Владимир Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры авиа- и ракетостроения; Омский государственный технический университет. E-mail: vvmakarov@omgtu.tech.

Kuznetsov Viktor Ivanovich – Dr. Sc., Professor of the Department of Aircraft and Rocket Engineering; Omsk State Technical University. E-mail: vik.kuznetzov@yandex.ru.

Makarov Vladimir Vyacheslavovich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Aircraft and Rocket Engineering; Omsk State Technical University. E-mail: vvmakarov@omgtu.tech.
