

УДК 533.6.07

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-273-283

**Для цитирования:** Кузнецов В. И., Макаров В. В., Щука И. О. Метод расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 273–283. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-273-283.

**For citation:** Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shchuka I. O. [Method for calculating the optimal geometry of a vortex ejector]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 273–283. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-273-283.

## Метод расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора

В. И. Кузнецов<sup>1</sup>, В. В. Макаров<sup>1\*</sup>, И. О. Щука<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет  
Российская Федерация, 644050, г. Омск, просп. Мира, 11  
<sup>2</sup>Сибирский институт бизнеса и информационных технологий  
Российская Федерация, 644116, Омск, ул. 24-я Северная, 196  
E-mail: vvmakarov@omgtu.tech

*Составлена математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора, на базе которой разработана методика расчёта оптимальной геометрии. Методика расчета учитывает обмен работой и теплотой между высоконапорным (эжектирующим) газом и низконапорным (эжектируемым) газом.*

*Показано влияние вязкости и возникающих при этом касательных напряжений на обмен работой и теплотой в вихревом эжекторе. Совпадение расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.*

*Ключевые слова: вихревой эжектор, вязкость, касательные напряжения, математическая модель, методика расчета оптимальной геометрии.*

## Method for calculating the optimal geometry of a vortex ejector

V. I. Kuznetsov<sup>1</sup>, V. V. Makarov<sup>1\*</sup>, I. O. Shchuka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University  
11, Mira Av., Omsk, 644050, Russian Federation  
<sup>2</sup>Siberian Institute of Business and Information Technologies  
196, 24-ya Severnaya St., Omsk, 644116, Russian Federation  
E-mail: vvmakarov@omgtu.tech

*A mathematical model of the working process of the vortex ejector has been compiled, on the basis of which a method for calculating the optimal geometry has been developed. The calculation method takes into account the exchange of work and heat between a high-pressure (ejecting) gas and a low-pressure (ejected) gas.*

*The effect of viscosity and the resulting tangential stresses on the exchange of work and heat in the vortex ejector is shown. The coincidence of calculated and experimental data is satisfactory.*

*Keywords: vortex ejector, viscosity, tangential stresses, mathematical model, method of calculating optimal geometry.*

## **Введение**

Вихревой эжектор (вихревой компрессор) – простейшее и распространенное газодинамическое устройство, применяемое в разнообразных отраслях промышленности, в частности в авиа- и ракетостроении, вакуумной технике и различных аэродинамических установках [1; 2].

Основное достоинство эжектора как компрессора – отсутствие движущихся деталей, что существенно при работе с горячими либо агрессивными средами.

Отсутствие признанной физической и замкнутой математической модели сдерживает более широкое применение вихревых эжекторов в авиа- и ракетостроении [3; 4].

Вихревой эжектор – это вихревая труба, работающая в режиме вакуум-насоса. В общем случае эжектором называют любое устройство, в котором полное давление одного потока жидкости (сжимаемой и несжимаемой) увеличивается за счет обмена энергией с другим потоком, имеющим более высокую энергию. В результате взаимодействия потоков образуется их смесь, имеющая полную энергию выше низконапорной жидкости, но ниже полной энергии высоконапорной жидкости.

## **Постановка задачи**

Основная задача данной работы – на базе уточненной физической и замкнутой математической моделей составить методику расчета оптимальных геометрических параметров вихревого эжектора, произвести расчет и сравнить результаты с исследованиями других авторов [1; 5].

## **Материал и методы исследования**

Существуют несколько физико-математических моделей, объясняющих работу вихревой трубы в режиме вакуум-насоса (вихревой эжектор) [2; 6; 7]. Основной недостаток существующих физических моделей состоит в том, что по ним нельзя составить замкнутую математическую модель. Для получения единственного решения вводятся эмпирические зависимости. Как правило, эти формулы справедливы в узкой области исследований.

В ряде работ эжекторы называют компрессорами без движущихся частей, но ни в одной работе нет уравнений, в которых приводится механизм передачи энергии от высоконапорной жидкости (сжимаемой и несжимаемой) к низконапорной [8–10].

В качестве физической модели рабочего процесса вихревого эжектора принята модель, кратко изложенная в работе [1].

## **Физическая модель рабочего процесса вихревого эжектора**

Вихревой эжектор (ВЭ) – устройство, в котором происходит повышение полного давления низконапорной жидкости (сжимаемой или несжимаемой) (рис. 1).

Высоконапорная жидкость истекает из сопла 1 в камеру смещения (энергообмена) 3. В начальный момент времени высоконапорная жидкость начинает движение из сопла 1, а низконапорная жидкость находится в состоянии покоя. Под давлением центробежных сил высоконапорный газ движется по периферии камеры энергообмена 3, создавая разрежение на оси камеры. Под действием разности атмосферного давления и давления разрежения на оси камеры 3 воздух из атмосферы поступает через сопло 2 в камеру 3. В камере 3 силами вязкости с помощью касательных напряжений происходит энергообмен между высоконапорным и низконапорным потоками жидкости. После завершения энергообмена смесь поступает в вихревое сопло 4 для дальнейшего использования по назначению.

На основании вышеизложенной физической модели доработана математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора, которая была изложена ранее [1].

## **Математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора**

Сумма энергий высоконапорной и низконапорной жидкости равна энергии жидкости, выходящей из сопла 4 вихревого эжектора (рис. 1)

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

где

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

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

$$L_1 = c_p \cdot T_{01} \left( 1 - \frac{1}{\pi_{P1}^{*k}} \right) \cdot \eta_p^*, \quad (3)$$

где  $\eta_p^*$  – суммарный КПД расширения (отношение реальной работы расширения к изотропной), берется по данным последних достижений в области турбостроения;  $\pi_{P1}^*$  – степень понижения высоконапорного газа ( $\pi_{P01}^* = P_{01}/P_{03}$ );  $T_{01}$  – полная температура газа на входе в вихревой эжектор, К;  $c_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении (Дж/(кг\*К));  $k$  – показатель адиабаты;  $P_{01}$  – полное давление высоконапорного газа на входе в вихревой эжектор, Па;  $P_{03}$  – полное давление газа на выходе из вихревого эжектора, Па.

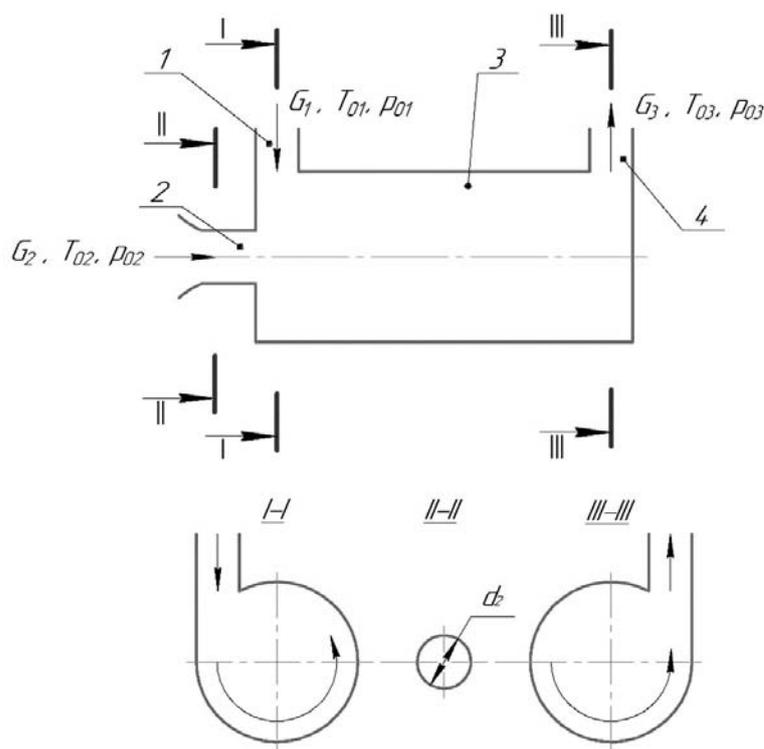


Рис. 1. Схема вихревого эжектора:

- 1 – воздухозаборник для входа эжектирующего (высоконапорного) газа;
- 2 – воздухозаборник для входа эжектируемого (низконапорного) газа;
- 3 – камера энергообмена; 4 – сопло для выхода смеси газов

Fig. 1. Diagram of the vortex ejector:

- 1 – air intake for the input of ejecting (high-pressure) gas;
- 2 – air intake for the input of ejected (low-pressure) gas;
- 3 – energy exchange chamber; 4 – nozzle for the release of a mixture of gases

Энергия низконапорного газа после подведения к нему энергии от высоконапорного газа касательными напряжениями, возникающими при движении вязкой жидкости, за счет разности угловых скоростей

$$N_2 = G_2 \cdot L_2, \quad (4)$$

где  $G_2$  – расход низконапорного газа, кг/с;  $L_2$  – удельная энергия низконапорного газа после подведения к нему кинетической энергии от высоконапорного газа, Дж/кг;

$$L_2 = c_p T_{02} \left( \pi_c^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_c^*}, \quad (5)$$

где  $\eta_c^*$  – суммарный КПД процесса сжатия (отношение изоэнтальпической работы сжатия к реальной), берется по данным последних достижений в области компрессоростроения;  $\pi_c^*$  – степень повышения полного давления низконапорного газа за счет подвода кинетической энергии касательными напряжениями в вязкой жидкости от высоконапорного газа

$$\pi_c^* = P_{03} / P_H, \quad (6)$$

где  $T_{02}$  – полная температура низконапорного газа на входе в вихревой эжектор, К;  $P_{03}$  – полное давление газа на выходе из эжектора, Па;  $P_H$  – статическое давление среды, в которую выходит газ из вихревого эжектора, Па.

Полная энергия газа на выходе из вихревого эжектора

$$N_3 = G_3 L_3, \quad (7)$$

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

$$L_3 = c_p T_{03} \left( 1 - 1 / \pi_{P3}^{*\frac{k-1}{k}} \right) \eta_P^*; \quad (8)$$

$\pi_{P3}^* = P_{03} / P_H$  – степень понижения полного давления газа на выходе из вихревого эжектора;  $T_{03}$  – полная температура газа на выходе из эжектора, К;

$$\Pi = \frac{G_2}{G_1} \text{ – степень эжекции.} \quad (9)$$

Уравнения (2)–(9) подставляются в уравнение (1):

$$G_1 c_p T_{01} \left[ 1 - (P_{03} / P_{01})^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_P^* + G_2 c_p T_{02} \left[ (P_{03} / P_H)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_c^*} = G_3 c_p T_{03} \left[ 1 - (P_H / P_{03})^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_P^*. \quad (10)$$

Уравнение (10) является уравнением энергии газа в механической форме. В тепловой форме это уравнение имеет вид [13; 14]:

$$G_1 i_{01} + G_2 i_{02} = G_3 i_{03}, \quad (11)$$

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 высоконапорного газа, низконапорного газа и смеси газов на выходе из вихревого эжектора соответственно.

При  $c_{pj} = c_p = \text{const}$  и  $G_2 / G_1 = \Pi$  уравнение (11) преобразуется к виду:

$$(\Pi + 1) \frac{T_{03}}{T_{01}} = 1 + \Pi \frac{T_{02}}{T_{01}}. \quad (12)$$

Полные температуры высоконапорного и низконапорного газов на входе в вихревой эжектор могут в частном случае иметь одну и ту же температуру, т. е.  $T_{01} = T_{02}$ . Тогда из уравнения энергии в тепловой форме (12) следует, что

$$T_{01} = T_{02} = T_{03}. \quad (13)$$

С учетом уравнения (13) уравнение энергии в механической форме (10) можно преобразовать следующим образом:

$$\left[ 1 - \left( \frac{P_{03}}{P_{01}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_P^* + \Pi \left[ \left( \frac{P_{03}}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_C^*} = (\Pi + 1) \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_{03}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_P^*. \quad (14)$$

В уравнении (14) одна неизвестная величина, а именно полное давление газа на выходе из вихревого эжектора  $P_{03}$ .

После несложных преобразований уравнение (14) приводится к виду:

$$ax^2 + bx + c = 0, \quad (15)$$

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

Решение квадратного уравнения (15) позволяет определить величину полного давления газа на выходе из вихревого эжектора

$$P_{03} = x^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (16)$$

В уравнении (16) знак плюс перед корнем квадратным взят потому, что полное давление газа на выходе из вихревого эжектора не может иметь отрицательное значение.

Высокотемпературный газ передает кинетическую энергию низконапорному с помощью касательных напряжений, возникающих в вязкой среде, за счет разности скоростей. Обмен работой приводит также и к изменению температуры торможения. Температура торможения или полная температура высоконапорного газа падает, низконапорного растет [1; 14; 15].

Температура торможения высоконапорного и низконапорного газов определяется известными уравнениями термогазодинамики

$$T_{01P} = T_{01} \left[ 1 - \left( 1 - 1/\pi_{T1}^* \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_P^*; \quad (17)$$

$$T_{02C} = T_{02} \left[ \left( \pi_C^* \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_C^*} + 1. \quad (18)$$

Температуру заторможенного потока на выходе из вихревого эжектора можно определить по законам теории теплопередач или по формуле (12).

### Обсуждение результатов

На базе вышеприведенной замкнутой математической модели составлена методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора по необходимым термодинамическим параметрам.

Обмен кинетической энергией возникает в вязкой жидкости с помощью касательных напряжений при разности скоростей движения высоконапорного и низконапорного газов.

Обмен работой и теплотой приводит к снижению полного давления высоконапорного газа и к повышению полного давления низконапорного газа. На выходе из эжектора газ имеет однородное давление  $P_{03}$  и полную температуру  $T_{03}$ .

Оптимизация геометрии вихревого эжектора ведется по заданной степени эжекции  $\Pi$ .

Методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора (один из возможных вариантов расчета). Основные данные для расчета берутся в соответствии со схемой (рис. 1).

Исходные данные для расчета:

$P_{01} = 1,5 \cdot 10^5$  Па – полное давление высоконапорного газа (воздуха) на входе в вихревой эжектор;

$T_{01} = 288$  К – полная температура воздуха на входе в вихревой эжектор;

$P_{02} = P_H = 1,013 \cdot 10^5$  Па – полное давление низконапорного газа на входе в вихревой эжектор;

$T_{02} = 288$  К – полная температура низконапорного воздуха на входе в эжектор;

$G_1 = 0,2$  кг/с – расход высоконапорного воздуха;

$\Pi = \frac{G_2}{G_1} = 0,1$  – степень эжекции;

$\eta_p^* = 0,92$  – суммарный КПД при совершении работы расширения высоконапорного потока;

$\eta_c^* = 0,85$  – суммарный КПД процесса сжатия низконапорного потока;

$k = 1,4$  – показатель адиабаты воздуха;

$c_p = 1003,5$  Дж/(кг · К) – теплоемкость при постоянном давлении воздушного потока;

$R = 287$  Дж/(кг · К) – газовая постоянная воздуха;

$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} [кг \cdot К/Дж]^{0,5} = 0,0404$  – коэффициент для воздуха;

$m = 0,0397$  – для продуктов сгорания керосина.

Определить:

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

$T_{03}$  – полная температура воздуха на выходе из эжектора, К;

$F_1$  – площадь среза сопла высоконапорного воздуха, м<sup>2</sup>;

$F_2$  – площадь воздухозаборника для входа в вихревой эжектор низконапорного воздуха, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина камеры смещения вдоль оси вихревого эжектора, м;

Расчет:

1. Коэффициент  $a$  :

$$a = \frac{\eta_p^*}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\Pi}{\eta_c^*} \cdot \frac{1}{P_H^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{0,92}{(1,5 \cdot 10^5)^{0,286}} - \frac{0,1}{0,85} \cdot \frac{1}{(1,013 \cdot 10^5)^{0,286}} = 0,03044 - 0,00435 = 0,0261.$$

2. Коэффициент  $b$  :

$$b = \Pi \left( \frac{1}{\eta_c^*} + \eta_p^* \right) = 0,1 \left( \frac{1}{0,85} + 0,92 \right) = 0,1(1,1765 + 0,92) = 0,20965.$$

3. Коэффициент  $c$  :

$$c = (\Pi + 1) \eta_c^* P_H^{\frac{k-1}{k}} = 1,1 \cdot 0,92 (1,013 \cdot 10^5)^{0,286} = 27,339.$$

4. Полное давление воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$P_{03} = \left( \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{-0,20965 + \sqrt{0,20965^2 + 4 \cdot 0,0261 \cdot 27,339}}{2 \cdot 0,0261} \right)^{3,5} =$$

$$= 28,5969^{3,5} = 1,2506 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

5. Полная температура воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$T_{03} = \frac{1}{\Pi + 1} T_{01} + \frac{\Pi}{\Pi + 1} T_{02} = \frac{1}{0,1 + 1} 288 + \frac{0,1}{0,1 + 1} 288 = 288 \text{ К.}$$

6. Газодинамическая функция давления высоконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$\pi(\lambda_1) = \frac{P_H}{P_{01}} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,5 \cdot 10^5} = 0,6753.$$

7. Коэффициент скорости высоконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$\lambda_1 = \sqrt{\left[ 1 - \pi(\lambda_1)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}} = \sqrt{\left[ 1 - 0,6753^{0,286} \right]^{\frac{1,4+1}{1,4-1}}} = 0,79824.$$

8. Приведенный расход высоконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$q(\lambda_1) = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_1 \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left( \frac{1,4+1}{2} \right)^{2,5} 0,79824 \left( 1 - \frac{1,4-1}{1,4+1} 0,79824^2 \right)^{2,5} = 0,9510.$$

9. Площадь входа в воздухозаборник для высоконапорного воздуха:

$$F_1 = \frac{G_1 \sqrt{T_{01}}}{m P_{01} q(\lambda_1)} = \frac{0,2 \sqrt{288}}{0,0404 \cdot 1,5 \cdot 10^5 \cdot 0,9510} = 5,8894 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

10. Диаметр воздухозаборника для входа высоконапорного воздуха:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,8894 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 27,39 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

11. Расход низконапорного воздуха на входе в вихревой эжектор:

$$G_2 = \Pi G_1 = 0,1 \cdot 0,2 = 0,02 \text{ кг/с.}$$

12. Площадь среза воздухозаборника на входе в вихревой эжектор низконапорного воздуха:

$$F_2 = \frac{G_2 \sqrt{T_{02}}}{m P_{02} q(\lambda_2)} = \frac{0,02 \sqrt{288}}{0,0404 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot 1} = 0,8293 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где  $q(\lambda_2) = 1$ , так как на оси вихревого эжектора вакуум и перепад давлений на входе в воздухозаборник сверхкритический.

13. Диаметр воздухозаборника на входе в вихревой эжектор низконапорного воздуха:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4F_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,8293 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 10,28 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

14. Полная температура высоконапорного воздуха после завершения энергообмена с низконапорным воздухом:

$$T_{01r} = T_{01} \left[ 1 - \left( 1 - 1 / \pi_{T_3}^* \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \eta_P^* = 288 \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{1,2506 \cdot 10^5}{1,5 \cdot 10^5} \right)^{0,286} \right) 0,92 \right] = 274,57 \text{ К.}$$

15. Полная температура низконапорного воздуха после завершения энергообмена с высоконапорным воздухом:

$$T_{02C} = T_{02} \left[ \left( \pi_C^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_C^*} + 1 \right] = 288 \left[ \left( \left( \frac{1,2506 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5} \right)^{0,286} - 1 \right) \frac{1}{0,85} + 1 \right] = 309,05 \text{ К.}$$

16. Газодинамическая функция давления воздуха на срезе выходного сопла вихревого эжектора:

$$\pi(\lambda_3) = \frac{P_3}{P_{03}} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,2506 \cdot 10^5} = 0,810.$$

17. Коэффициент скорости:

$$\lambda_3 = \sqrt{\left[ 1 - \pi(\lambda_3)^{\frac{k-1}{k}} \right] \frac{k+1}{k-1}} = \sqrt{\left[ 1 - 0,810^{0,286} \right] \frac{1,4+1}{1,4-1}} = \sqrt{0,35092} = 0,5924.$$

18. Расходная газодинамическая функция смеси воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$q(\lambda_3) = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_3 \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_3^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = 1,2^{2,5} \cdot 0,5924 \left( 1 - \frac{1,4-1}{1,4+1} 0,5924^2 \right)^{2,5} = 0,80374.$$

19. Площадь среза сопла для выхода смеси воздуха из вихревого эжектора:

$$F_3 = \frac{G_3 \sqrt{T_{03}}}{m P_{03} q(\lambda_3)} = \frac{0,22 \sqrt{288}}{0,0404 \cdot 1,2506 \cdot 10^5 \cdot 0,80374} = 9,194 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

20. Диаметр среза сопла для выхода смеси воздуха из вихревого эжектора:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,194 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = \sqrt{11,7120 \cdot 10^{-4}} = 3,422 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

21. Величина касательных напряжений между высоконапорным и низконапорным воздухом:

$$\tau = P_{01} - P_{03} = 1,5 \cdot 10^5 - 1,2506 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

22. Температурная газодинамическая функция смеси газов на выходе из вихревого эжектора:

$$\tau(\lambda_3) = \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_3^2 \right) = 1 - \frac{1,4-1}{1,4+1} 0,5924^2 = 0,94151.$$

23. Статическая температура смеси газов на выходе из вихревого эжектора:

$$T_3 = T_{03} \tau(\lambda_3) = 288 \cdot 0,94151 = 271,15 \text{ К.}$$

24. Критическая скорость смеси воздуха на выходе из вихревого эжектора:

$$a_{кр3} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_{03}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} 287 \cdot 288} = 310,5 \text{ м/с.}$$

25. Скорость смеси воздуха на выходе из эжектора:

$$V_3 = \lambda_3 \cdot a_3 = 0,5924 \cdot 310,5 = 183,94 \text{ м/с.}$$

26. Средняя скорость движения высоконапорного воздуха от входа до выхода из вихревого эжектора:

$$V_{cp} = \frac{V_1 + V_3}{2} = \frac{310,5 + 183,94}{2} = 247,22 \text{ м/с.}$$

27. Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_3 = \frac{V_{\text{cp}} d_1}{V_1} = \frac{247,22 \cdot 27,39 \cdot 10^{-3}}{1,506 \cdot 10^{-5}} = 449625.$$

28. Коэффициент сопротивления трения (формула Блазиуса):

$$\xi_1 = \frac{0,3125}{\text{Re}_3^{0,25}} = \frac{0,3125}{449625^{0,25}} = 0,01207.$$

29. Плотность газа на входе в эжектор:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{287 \cdot 288 \cdot \left(1 - \frac{1,4-1}{1,4+1} 0,79824^2\right)} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{73878,1} = 1,371 \text{ кг/м}^3.$$

### Обсуждение результатов

На основе решения замкнутой математической модели, описывающей рабочий процесс вихревого эжектора, составлена методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора. Дан пример расчета одного из возможных вариантов вихревого эжектора.

Расчеты по данной методике удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными наших исследований и исследований других авторов [12; 16].

Теоретически и экспериментально установлено, что энергообмен между высоконапорным и низконапорным газами происходит путем передачи кинетической энергии касательными напряжениями в вязкой среде при наличии градиента угловых скоростей, возникающих в вихревом эжекторе. Результатом энергообмена является повышение энергии низконапорного газа и понижение энергии высоконапорного газа до значений полного давления и полной температуры на выходе из вихревого эжектора.

### Заключение

Результаты исследований авторов показали, что в вихревом эжекторе в результате взаимодействия низконапорный (эжектируемый) газ повышает полную температуру и полное давление за совершение над ним работы со стороны высоконапорного (эжектирующего) газа. Кинетическая энергия передается касательными напряжениями в вязкой среде за счет градиента угловых скоростей.

Составлена замкнутая математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора, результатом решения является разработанная методика расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора. Результат расчета по данной методике дает удовлетворительное совпадение с теоретическими исследованиями авторов и экспериментами других исследователей.

### Библиографические ссылки

1. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Вихревой и струйный эжекторы, трубы Гартмана-Шпренгера, эффект Ранка: механизм энергообмена // Решетневские чтения. 2021. С. 201–202.
2. Аркадов Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М. : Физматлит, 2001. 336 с.
3. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // AJP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876.
4. Разработка стенда для визуализации и экспериментального исследования рабочего процесса в вихревом струйном устройстве / А. Ю. Усс, А. С. Пугачук, А. В. Чернышев и др. // Машиностроение. 2020. № 7 (724).
5. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Метод расчета оптимальной геометрии вихревого эжектора // Решетневские чтения. 2021. С. 205–206.

6. Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоком газа // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 78–86. Doi: 29206/2588-0373-2019-3-78-86.
7. Мартынов В. С., Бродянский В. М. Что такое вихревая труба? М. : Энергия, 1976. 152 с.
8. Уколов А. И., Родионов В. П. Верификация результатов численного моделирования и экспериментальных данных влияние кавитации на гидродинамические характеристики струйного потока // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 4. С. 102–114.
9. Курников А. С., Мизгирев Д. С. Черепкова Е. А Расчет гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой смещения. // Вестник гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2015. № 4 (32). С. 60–66.
10. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. P. 380–388. Doi:10.1016/J.PROENG.2016.07.718.
11. Кузнецов В. И., Макаров В. В., Шандер А. Ю. Физико-математическая модель рабочего процесса вихревой трубы // Омский науч. вестник. Сер. Авиационно-ракетно-космич. техн. 2021. Т. 5, № 2. С. 78–87. Doi:10.25206/2588-0373-2021-5-2-78-87.
12. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // AJP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876. 020025. Doi: 10.1063/1.4998845.
13. Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоком газам // Омский науч. вестник. Сер. Авиационно-ракетно-энергетич. машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 78–86. Doi: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86.
14. Vortex With flow control by synthetic jets / V. Tesat, Z. Brouckova, J. Kordik et al. // The European Physical journal Web of Conferences. 2012. Vol. 25. P. 01092. Doi: 10.1051 / epjcont / 20122501292.
15. Степин В. А. Вихревые и двухфазные потоки в технологии промывки судовых систем : монография. Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова.
16. Кузнецов В. И., Якимускин Р. В., Шерберген А. Ю. Результаты сравнительных испытаний охладителя наддувочного воздуха комбинированного дизеля // Спец. техника и технологии транспорта : сб. науч. ст. СПб., 2019. С. 131–139.

## References

1. Kuznetsov V. I., Makarov V. V. [Vortex and jet ejectors, Hartmann-Sprenger tubes, Rank effect: energy exchange mechanism]. *Reshetnevskie chteniya*. 2021, P. 201–202 (In Russ.).
2. Arkadov Yu. K. *Novye gazovye ezhektory i ezhektionnye protsessy* [New gas ejectors and ejection processes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 336 p (In Russ.).
3. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *AJP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876.
4. Uss A. Yu., Pugachuk A. S., Chernyshev A. V. et al. [Development of a stand for visualization and experimental study of the working process in a vortex jet device]. *Mashinostroenie*. 2020, No. 7, P. 724 (In Russ.).
5. Kuznetsov V. I., Makarov V. v. [Method of calculating the optimal geometry of a vortex ejector]. *Reshetnevskie chteniya*. 2021. P. 205–206 (In Russ.).
6. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. [Development of a calculation method and creation of a vortex jet device for gas flow control]. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie*. 2019, Vol. 3, No. 2, P. 78–86 (In Russ.). Doi: 29206/2588-0373-2019-3-78-86.
7. Martynov V. S., Brodyanskii V. M. *Chto takoe vikhrevaya truba?* [What is a vortex tube?]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 152 p.

8. Ukolov A. I., Rodionov V. P. [Verification of the results of numerical modeling and experimental data on the effect of cavitation on the hydrodynamic characteristics of the jet flow]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki*. 2018. № 4. P. 102–114 (In Russ.).
9. Kurnikov A. S., Mizgirev D. S. Cherepkova E. A. [Calculation of a hydrodynamic cavitator with a toroidal displacement chamber.]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova*. 2015, No. 4 (32), P. 60–66 (In Russ.).
10. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. P. 380–388. Doi: 10.1016/J.PROENG.2016.07.718.
11. Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shander A. Yu. [Physical and mathematical model of the working process of a vortex tube]. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika*. 2021, Vol. 5, No. 2, P. 78–87 (In Russ.). Doi: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-78-87.
12. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *AJP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876, P. 020025. Doi: 10.1063/1.4998845.
13. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. [Development of a calculation method and creation of a vortex jet device for gas flow control]. *Omskii nauchnyi vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie*. 2019, Vol. 3, No. 2, P. 78–86 (In Russ.). Doi: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86.
14. Tesat V., Brouckova Z., Kordik J., Travnicek Z., Paszynsku V. Vortex With flow control by syntheticjets. *The European Physical journal Web of Conferences*. 2012, Vol. 25. P. 01092. Doi: 10.1051 / epjcont / 20122501292.
15. Stepin V. A. *Vikhrevye i dvukhfaznye potoki v tekhnologii promyvki sudovykh system* [Vortex and two-phase flows in the technology of flushing ship systems]. Sev. (Arctic) feder. un-t im. M. V. Lomonosov.
16. Kuznetsov V. I., Yakimushkin R. V., Sherbergen A. Yu. [Results of Comparative Tests of the Combined Diesel Charge Air Cooler, Spec. technique and technology of transport]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta*. Sankt-Peterburg, 2019, P. 131–139.

© Кузнецов В. И., Макаров В. В., Щука И. О., 2022

---

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

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

**Щука Ирина Олеговна** – кандидат технических наук, доцент; Сибирский институт бизнеса и информационных технологий.

**Kuznetsov Viktor Ivanovich** – Dr. Sc., Professor of the Department of Aircraft and Rocket Engineering; Omsk State Technical University. E-mail: vi.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.

**Shchuka Irina Olegovna** – Cand. Sc., Cent; Siberian Institute of Business and Information Technologies.

---