https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-2-63-73

УДК 533.6.07

Теоретические основы рабочего процесса вихревой трубы в режиме вакуум-насоса (вихревого эжектора)

В. И. Кузнецов, В. В. Макаров, А. Ю. Шандер

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация

Составлена уточненная физическая модель работы вихревой трубы в режиме вакуум-насоса (вихревого эжектора). Учитывает количество энергии, передаваемой от эжектирующего к эжектируемому потоку газа. Составлена замкнутая система уравнений, описывающая рабочий процесс вихревого эжектора. На базе этой системы уравнений составлены две основные методики расчета вихревого эжектора: методика расчета основных геометрических размеров и методика расчета характеристик при известных геометрических размерах. Показано влияние вязкости на энергообмен в вихревом эжекторе. Совпадение расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.

Ключевые слова: вихревая труба, вакуум-насос, вихревой эжектор, вязкость, тангенциальные напряжения, градиент угловых скоростей

Для цитирования: Кузнецов В. И., Макаров В. В., Шандер А. Ю. Теоретические основы рабочего процесса вихревой трубы в режиме вакуум-насоса (вихревого эжектора) // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2022. № 2. С. 63–73. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-2-63-73

For citation: Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shander A. Yu. Fundamentals of the working process of a vortex tube operating in the vacuum pump (vortex ejector) mode // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2022. No. 2. P. 63–73. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-2-63-73

Поступила 12.01.2022 *Отрецензирована* 10.02.2022 *Одобрена* 04.03.2022 *Опубликована* 17.05.2022

Введение

Газовый эжектор или вихревой компрессор (вихревой эжектор) – простейшие и распространенное газодинамическое устройство, применяемое в разнообразных отраслях промышленности, в частности в авиа- и ракетостроении, вакуумной технике и различных экспериментальных аэродинамических установках [1, 2, 8].

Основным достоинством эжектора как компрессора является отсутствие движущихся и трущихся деталей, что существенно при работе с горячими либо агрессивными средами.

© Кузнецов В. И., Макаров В. В., Шандер А. Ю., 2022

Постановка задачи

Вихревые эжекторы применяются во многих областях техники. Однако более широкое распространение вихревых эжекторов (ВЭ) в аэрокосмической технике и других областях машиностроения, а также в промышленной аэродинамике сдерживает отсутствие замкнутой математической модели. Отсутствие этой модели, вполне возможно, связано с тем, что современная физическая модель не совсем соответствует реальным процессам, протекающим в эжекторах различных схем.

На основании вышеизложенного основной задачей данной работы является попытка уточнения существующей модели, соответствующей реальным процессам, протекающим в вихревом эжекторе.

Материалы и методы исследования

Существуют несколько физико-математических моделей, объясняющих работу эжектора [1, 2, 9]. Основной недостаток данных физических моделей состоит в том, что по ним нельзя составить замкнутую математическую модель. Для получения единственного решения вводятся эмпирические формулы на основании экспериментальных исследований. Как правило, эти формулы справедливы в той области, в которой были проведены исследования.

В ряде работ эжекторы называют компрессорами без движущихся частей, но ни в одной работе нет уравнений, показывающих механизм передачи энергии от эжектирующего газа к эжектируемому [5, 4, 10].

На основании теоретических и экспериментальных исследований других авторов и собственных представлена физическая модель вихревого эжектора, в которой учитывается обмен работой и теплотой между эжектирующим и эжектируемым газами. Введение в систему уравнений, описывающих рабочий процесс вихревого эжектора, обмена работой и теплотой позволяет замкнуть систему уравнений [8, 11, 17].

На основании решения замкнутой системы уравнений составлены две методики:

- методика расчета оптимальных геометрических размеров вихревого эжектора (приложение 1);
- методика расчета характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах (приложение 2).

Физическая модель работы вихревого эжектора

Вихревой эжектор – устройство, в котором полное давление эжектируемого газа увеличивается за счет энергообмена с эжектирующим газом. Эжектирующий газ имеет более высокое полное давление и совершает работу над эжектируемым газом силами вязкости, что приводит к повышению давления эжектируемого газа. В результате взаимодействия потоков на выходе из вихревого эжектора (ВЭ) образуется смесь, имеющая полное давление выше, чем давление эжектируемого газа, но ниже полного давления эжектирующего газа [1].

Предлагается следующая физическая модель рабочего процесса вихревого эжектора.

Эжектирующий (высоконапорный) газ истекает из сопла в камеру смешения (рис. 1).

В начальный момент работы ВЭ эжектирующий газ начинает течение из сопла, а эжектируемый газ находится в состоянии покоя. Под действием центробежных сил эжектирующий газ движется по периферии камеры энергообмена 3, создавая разряжение на оси камеры. Под действием разности атмосферного давления и давление разряжения на оси камеры 3 воздух из атмосферы поступает

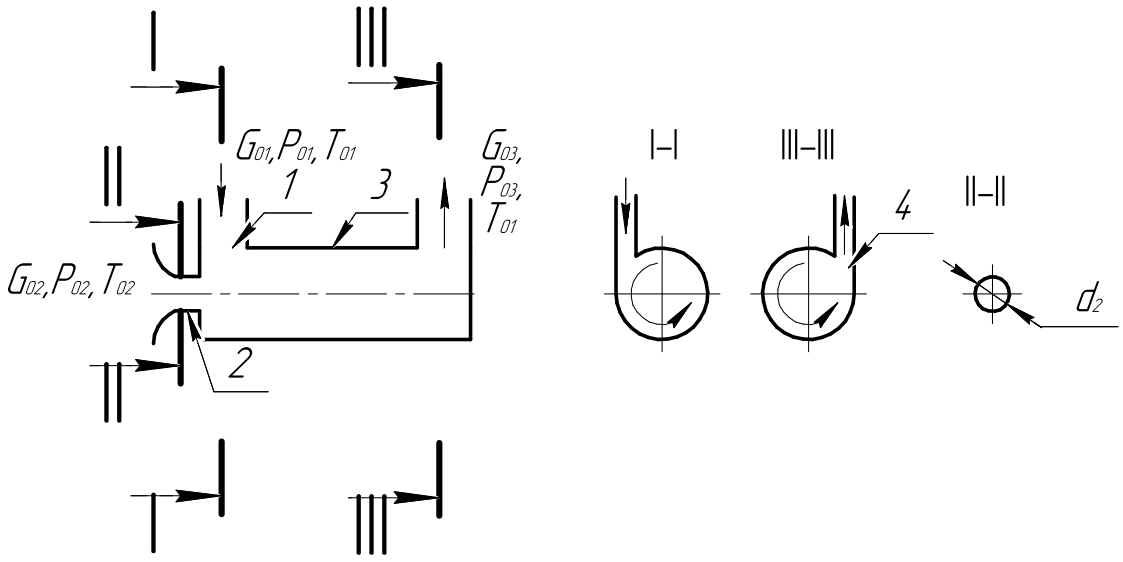

Рис. 1. Схема вихревого эжектора: 1 – канал для входа эжектирующего газа; 2 – канал для входа эжектируемого газа; 3 – камера энергообмена; 4 – канал для выхода смеси газа

через сопло 2 в камеру 3. В камере 3 силами вязкости происходит энергообмен между эжектирующим и эжектируемым газами. После завершения энергообмена смесь газов поступает в сопло 4 для дальнейшего использования по назначению. Трение и теплообмен на стенках корпуса не учитываются, так как они учитываются КПД сжатия η_c и расширения η_p.

На основании вышеизложенной физической модели составлена математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора.

Математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора

Сумма энергий эжектирующего и эжектируемого газов равна энергии газа, выходящего из вихревого эжектора

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

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

где N_1 – энергия эжектирующего газа, Вт;
G_1 – расход эжектирующего газа, Кг/с;
L – удельная энергия эжектирующего газа, Дж/кг.

$$L_1 = C_p T_{01}\left(1 - \frac{1}{\pi^{*\frac{k-1}{k}}_{p1}}\right)\eta_p, \quad (3)$$

где η_p – суммарный КПД расширения (отношение реальной работы расширения к изоэнтропной).

Энергия эжектируемого газа после подведения к нему энергии от эжектирующего газа силами вязкости за счет разности линейных скоростей

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

где G_2 – расход эжектируемого газа, кг/с;
L_2 – удельная энергия эжектируемого газа после совершения над ним работы эжектирующего 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 η_c^* – суммарный КПД процесса сжатия (отношение изоэнтропной работы сжатия к реальной).

Суммарная энергия газа на выходе из вихревого эжектора

$$N_3 = G_3 \cdot L_3, \quad (6)$$

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

$$L_3 = C_p T_{03}\left(1 - \frac{1}{\pi^{*\frac{k-1}{k}}_{p3}}\right)\eta_p. \quad (7)$$

Степень понижения полного давления эжектирующего газа

$$\pi^*_{p1} = \frac{P_{01}}{P_{03}}, \quad (8)$$

где P_{01} – полное давление эжектирующего газа на входе в эжектор, Па;
P_{03} – полное давление газа на выходе из эжектора, Па.

Степень повышения полного давления эжектируемого газа за счет энергообмена силами вязкости с эжектируемым газом

$$\pi^*_c = \frac{P_{03}}{P_H}, \quad (9)$$

где P_H – давление среды, откуда поступает эжектируемый газ, Па.

Степень понижения полного давления газа на выходе из вихревого эжектора

$$\pi^*_{p3} = \frac{P_{03}}{P_H}. \quad (10)$$

Уравнения (2)–(10) подставляются в уравнение (1):

$$\begin{aligned} &G_1 \cdot C_p \cdot T_{01} \cdot \left(1 - (\frac{P_{03}}{P_{01}})^{\frac{k-1}{k}}\right) \cdot \eta_p^* + \\ &+ G_2 \cdot C_p \cdot T_{02}\left((\frac{P_{03}}{P_H})^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)\frac{1}{\eta_c^*} = \\ &= G_3 \cdot C_p \cdot To_3\left(1 - (\frac{P_H}{P_{03}})^{\frac{k-1}{k}}\right)\eta_p^*. \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнение (11) является уравнением энергии газа в механической форме. В тепловой форме это уравнение имеет вид [11, 13, 15]

$$G_1 \cdot i_{01} + G_2 \cdot i_{02} = G_3 \cdot i_{03}, \quad (12)$$

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 = 1–3 – параметры газа на входе эжектирующего газа, эжектируемого газа и на выходе из вихревого эжектора соответственно.

При $C_{pj} = C_p$ = const и $G_2/G_1 = n$, уравнение (12) преобразуется к виду

$$(n+1)\frac{T_{03}}{T_{01}} = 1 + n\frac{T_{02}}{T_{01}}. \qquad (13)$$

Полные температуры эжектирующего и эжектируемого газов на входе в эжектор могут иметь одну и ту же температуру, т.е. $T_{02} = T_{01}$. Тогда из уравнения энергии в тепловой форме (13) следует, что

$$T_{01} = T_{02} = T_{03}. \qquad (14)$$

С учетом уравнения (14) уравнение энергии в механической форме (11) можно преобразовать следующим образом:

$$\left(1-\left(\frac{P_{03}}{P_{01}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)\eta_p^* + n\left(\left(\frac{P_{03}}{P_H}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)\frac{1}{\eta_c^*} = (n+1)\left(1-\left(\frac{P_H}{P_{03}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)\eta_p. \qquad (15)$$

В уравнении (15) одна неизвестная величина. Это полное давление газа на выходе из вихревого эжектора P_{03}.

Для нахождения полного давления P_{03} раскрываются скобки уравнения (15):

$$\eta_p^* - \frac{\eta_p^*}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}}\cdot P_{03}^{\frac{k-1}{k}} + \frac{n}{P_H^{\frac{k-1}{k}}}\cdot\frac{1}{\eta_c^*}\cdot P_{03}^{\frac{k-1}{k}} - \frac{n}{\eta_c^*} = (n+1)\cdot\eta_p^* - (n+1)\cdot\eta_p^*\cdot P_H^{\frac{k-1}{k}}\cdot\frac{1}{P_{03}^{\frac{k-1}{k}}}. \qquad (16)$$

Все члены уравнения (16) умножаются на величину $P_{03}^{\frac{k-1}{k}}$:

$$\left(\frac{\eta_p^*}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{n}{P_H^{\frac{k-1}{k}}}\cdot\frac{1}{\eta_c^*}\right)\cdot P_{03}^{2\cdot\frac{k-1}{k}} + n\left(\frac{1}{\eta_c^*} + \eta_p^*\right)\cdot P_{03}^{\frac{k-1}{k}} - (n+1)\cdot\eta_p^*\cdot P_H^{\frac{k-1}{k}} = 0. \qquad (17)$$

Уравнение (17) преобразовывается к виду:

$$ax^2 + bx - c = 0, \qquad (18)$$

где $x = P_{03}^{\frac{k-1}{k}}$;

$$a = \frac{\eta_p^*}{P_{01}^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{n}{\eta_c^*}\cdot\frac{1}{P_H^{\frac{k-1}{k}}};$$

$$b = n\cdot\left(\frac{1}{\eta_c^*} + \eta_p^*\right);$$

$$c = (n+1)\cdot\eta_p^*\cdot P_H^{\frac{k-1}{k}}.$$

Полное давление газа на выходе из вихревого эжектора находится путем решения квадратного уравнения (18):

$$P_{03} = x^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \qquad (19)$$

В уравнении (19) знак плюс перед корнем квадратным взят потому, что полное давление газа на выходе из вихревого эжектора не может иметь отрицательное значение.

На входе в вихревой эжектор скорости эжектирующего и эжектируемого газов имеют различные значения. За счет разности скоростей возникают касательные напряжения, приводящие к снижению скорости эжектирующего газа и повышению скорости эжектируемого газа. Следовательно, силами вязкости кинетическая энергия передается от эжектирующего газа к эжектируемому [1]. Таким образом, эжектирующий газ совершает работу над эжектируемым газом, в результате чего полное давление эжектирующего газа падает, а эжектируемого – растет. Обмен работой приводит также и к изменению полной температуры газа. Полная температура эжектирующего газа падает, эжектируемого – растет [1, 12, 14].

Изменение полных температур эжектирующего и эжектируемого газов можно определить с помощью известных уравнений термодинамики [6, 7]:

$$T_{01p} = T_{01}\left[1-\left(1-\frac{1}{\pi_{T1}^{*\frac{k-1}{k}}}\right)\eta_p^*\right], \qquad (20)$$

$$T_{02c} = T_{02}\left[\left(\pi_c^{*\frac{k-1}{k}} - 1\right)\frac{1}{\eta_c^*} + 1\right], \qquad (21)$$

где T_{01p} – полная температура эжектирующего газа после завершения энергообмена с эжектируемым газом, К;

T_{02p} – полная температура эжектируемого газа после завершения энергообмена с эжектирующим газом, К.

Энергообмен заканчивается тогда, когда полное давление эжектирующего и эжектируемого 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 возникнет тепловой поток, идущий от более нагретого к менее нагретому, т.е.

$$Q = f(\Delta t) = f(T_г - T_x). \qquad (22)$$

Тепловой поток и температуру T_{03} на выходе из эжектора можно определить по формулам теории теплопередач или по формуле (13).

Длина пути взаимодействия (энергообмена) эжектирующего и эжектируемого потоков газа зависит от вязкости газа и касательных напряжений.

Касательные напряжения можно определять эмпирической зависимостью Ж. Буссинеска, по гипотезам Прандтля, Тейлора, А. Ферри, Колмогорова [16, 3].

Эмпирическая зависимость Ж. Буссинеска

Для вычисления турбулентного касательного напряжения пользуются соотношением, аналогичным закону трения Ньютона

$$\tau_T = \rho K \frac{\partial \overline{V}_x}{\partial y}, \qquad (23.1)$$

где K – коэффициент турбулентной вязкости, который определяется экспериментально.

Гипотеза Прандтля

Исходя из выражения «кажущегося» напряжения трения

$$\tau_T = -\rho \overline{V'_y V'_x}. \qquad (23.2)$$

Прандтль показал, что

$$\tau_T = \rho l^2 \frac{\partial \overline{V}_x}{\partial y} \left| \frac{\partial \overline{V}_x}{\partial y} \right|, \qquad (23.3)$$

где l – длина пути смешения.

Кроме того, Прандтлем была найдена полуэмпирическая зависимость, которую назвали «новая формула Прандтля».

В этом случае напряжение трения

$$\tau_T = \rho H b (\overline{V_{x\max}} - \overline{V_{x\min}}) \frac{\partial \overline{V}_x}{\partial y}, \qquad (23.4)$$

где H – экспериментальная величина;
$\overline{V_{x\max}}$, $\overline{V_{x\min}}$ – скорости потока на границах зоны смешения.

Гипотеза А. Ферри

Зависимость для коэффициента турбулентной вязкости

$$K = H_1 \overline{V_{x\max}}\, b, \qquad (24)$$

где $V_{\max}$ – максимальная скорость в струйном слое, b – ширина струйного слоя, H_1 – постоянная.

Между коэффициентом турбулентной вязкости и параметрами течений была установлена связь [16]

$$K = \frac{H_2(\rho \overline{V_x} - \rho_m \overline{V_{x\max}})b}{\rho_m}, \qquad (25)$$

где H_2 – эмпирическая постоянная; ρ, ρ_m – соответственно плотности в струе и на внешней границе потока; $\overline{V_x}$, $\overline{V_{x\max}}$ – скорости потоков.

Гипотеза Колмогорова

Турбулентная вязкость характеризуется кинетической энергией пульсаций и некоторым масштабом турбулентности

$$K = k \sqrt{e} L, \qquad (26)$$

где $K = 0{,}5(\overline{V'^2_x} + \overline{V'^2_y} + \overline{V'^2_z})$ – величина, пропорциональная кинетической энергии турбулентности;
L – масштаб турбулентности, соответствующий среднему размеру турбулентных вихрей;
$k = 0{,}2$ – эмпирическая постоянная.

Кроме того, величину касательных напряжений можно определить и по формуле [17]

$$\tau = P_{01} - P_{03} = \rho \varepsilon \frac{l}{d_э} \frac{V^2}{2}. \qquad (27)$$

Вышеприведенная математическая модель замкнута, по ней можно определить оптимальные геометрические размеры вихревого эжектора для получения заданной степени эжекции. По известным геометрическим размерам определяются характеристики вихревого эжектора во всем диапазоне режимов работы.

Расчетные и экспериментальные данные приведены на рисунке 2 [15, 18].

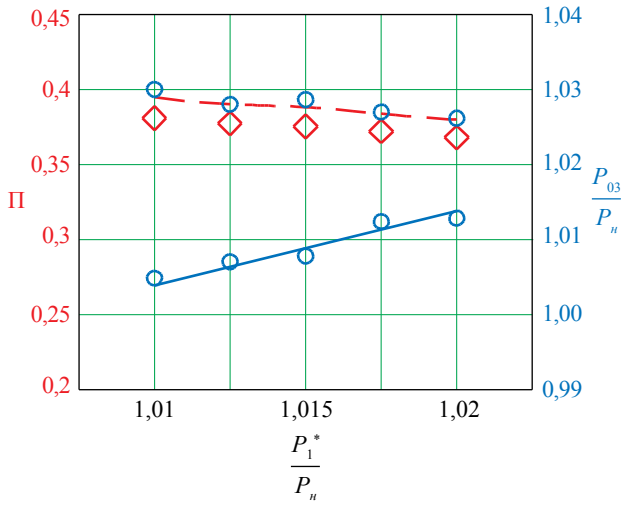

Рис. 2. Зависимость коэффициента эжекции от конструкции активного потока
– расчет, ○ – эксперимент [15], – расчет, ◇ – эксперимент [18]

Обсуждение результатов

Вышеприведенная математическая модель рабочего процесса вихревого эжектора замкнута. По ней можно составить две методики расчета:

- методика расчета геометрических характеристик вихревого эжектора для заданных термодинамических характеристик;
- методика расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических параметрах.

Расчеты по данным методикам дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными собственными и других авторов [2, 8, 15].

Теоретически и экспериментально установлено, что эжектируемый поток сжимается после движения по камере смешения, его полная температура растет за счет обмена работой с эжектирующим газом, полное давление – растет.

Обмен работой и теплотой с эжектируемым газом приводит к падению полного давления и полной температуры эжектирующего газа. На выходе из эжектора полное давление и полная температура эжектирующего и эжектируемого газов выравниваются.

Заключение

Представлены результаты теоретических исследований авторов работы и сравнение их с результатами экспериментов других авторов [2, 8, 15].

Показано, что в вихревом эжекторе в результате взаимодействия эжектируемый газ повышает свое полное давление и полную температуру за счет совершения над ним работы со стороны эжектирующего газа. В результате обмена работой полное давление и полная температура эжектирующего газа падает. В результате энергообмена возникает разность термодинамических температур, что приводит к возникновению теплового потока от высокотемпературного потока к низкотемпературному. Передача энергии от эжектирующего газа к эжектируемому идет силами вязкости за счет разности угловых скоростей [1].

Список литературы

1. Кузнецов В. И., Макаров В. В. Эффект Ранка: эксперимент, теория, расчет. М.: Инновационное Машиностроение, 2017. 376 с.

2. Ардов Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. М.: Издательство физ.-мат. литературы. 2001. 356 с.

3. Уколов А. И., Родионов В. П. Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора // Вестник Госуниверситета морского и речного флота им. адмирала Макарова, 2018.

4. Уколов А. И., Родионов В. П. Верификация результатов численного моделирования и экспериментальных данных влияния кавитации на гидродинамические характеристики струйного потока // Вестник Госуниверситета морского и речного флота им. адмирала Макарова, 2018.

5. Курников А. С., Мизгирев А. С., Герепкова Е. А. Расчет гидродинамического кавитатора с тороидальной камерой смещения // Вестник ВГАВТ. 2016. Вып. 47.

6. Блинков В. Н., Мелихов В. И., Парфенов Ю. В., Никонов С. М., Емельянов Д. А., Елкин Н. В., Трубкин Е. И. Экспериментальное исследование расходно-напорной характеристики эжектора с тангенциальным подводом пассивной среды для системы аварийного охлаждения активной зоны АЭС с ВВЭР // Фундаментальные

исследования. 2013. № 10(5). С. 949–952. URL: http //www.fundamentalresearch.ru/ru/article/view?id=32430

7. Ершов М. И., Волкова Ю. В., Мунц В. А. Моделирование режимов работы эжектора для рециркуляции анодных газов // Труды второй НТК молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 62–64.

8. Усс А. Ю., Пугачук А. С., Чернышев А. В., Тухтабуллин Ф. Г. Разработка стенда для визуализации и экспериментального исследования рабочего процесса в вихревом струйном устройстве // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 45–55.

9. Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоком газа. 2019.

10. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Presenture Regulator // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152.P. 380–388. DOI: 10.1016. / j.proeng.2016.07.718

11. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Presenture Regulator // AJP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876. 020025. DOI: 10. 1063/ 1.4998845

12. Tesat V., Brouckova Z., Kordik J., Travnicek Z., Peszynsku V. Vortex With flow control by syntheticjets // The European Physical Journal Web of Conferences. 2012. Vol. 25. 01092. P. DOI: 10. 1051 / epjcont/ 20122501092

13. Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоками газа // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3. № 2. С. 78–86. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-7886

14. Степин В. А. Вихревые и двухфазные потоки в технологии промывки судовых систем: монография. Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова.

15. Кузнецов В. И., Якумушкин Р. В., Шенбергер А. Ю. Результаты сравнительных испытаний охладителя наддувочного воздуха комбинированного дизеля // Сб. научных статей. Спб: (ВИ ЖДВИ ВОСО) ВА МТО, 2019. С. 131–139.

16. Краснов Н. Ф., Кощевой В. Н., Калугин В. Т. Аэродинамика отрывных течений: учеб. пособие для втузов. М.: Высшая школа, 1988. 351 с.

17. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

18. Халиулин Р. Р., Сыченков В. А., Панченко В. И. Разработка методики расчета эжекторов с малыми коэффициентами эжекции // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 1. С. 65–70.

Приложение 1. Методика расчета оптимальных геометрических размеров вихревого эжектора для получения заданной степени эжекции

Основные данные берутся в соответствии со схемой, показанной на рисунке 1.

Исходные данные:

$P_{01} = 2 \cdot 10^5$ Па; $T_{01} = 288$ К; $P_{02} = P_H = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па; $T_{02} = 288$ К; $k = 1{,}4$; $C_p = 1003{,}5$ Дж/(кг·К); $R = 287$ Дж/(кг·К); $\eta_0 = 0{,}92$; $n = 0{,}5$; $G_1 = 0{,}2$ кг/с; $\eta_c = 0{,}85$.

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

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

Определить: F_1 – площадь сопла для входа эжектирующего газа (м^2); F_2 – площадь сопла для ввода эжектируемого газа (м^2); F_3 – площадь сопла для выхода смеси из эжектора (м^2); l – длина эжектора (м), P_{03} – полное давление газа на выходе из эжектора.

Расчет

1. Коэффициент a

$$a = \frac{\eta_p}{P_{01}^{*\frac{k-1}{k}}} - \frac{n}{\eta_c^*} \cdot \frac{1}{P_H^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{T_{02}}{T_{01}} = \frac{0{,}92}{(2 \cdot 10^5)^{0{,}286}} - \frac{0{,}5}{0{,}85} \cdot \frac{1}{(1{,}013 \cdot 10^5)^{0{,}286}} \cdot \frac{288}{288} = 6{,}2621 \cdot 10^{-3}.$$

2. Коэффициент b

$$b = n \cdot (\frac{1}{\eta_c^*} + \eta_p^*) \cdot \frac{T_{02}}{T_{01}} = 0,5 \cdot (\frac{1}{0,85} + 0,92) \cdot \frac{288}{288} = 1,048235.$$

3. Коэффициент c

$$c = (1+n) \cdot \frac{T_{02}}{T_{01}} \cdot \eta_p^* \cdot P_H^{\frac{k-1}{k}} = (1+0,5) \cdot \frac{288}{288} \cdot 0,92 \cdot (1,013 \cdot 10^5)^{0,286} = 37,28327.$$

4. Полное давление газа на выходе из вихревого эжектора

$$P_{03} = (\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a})^{\frac{k}{k-1}} = (\frac{-1,048235 + \sqrt{1,048235 + 4 \cdot 6,2621 \cdot 10^3 \cdot 37,28327}}{2 \cdot 6,2621 \cdot 10^{-3}})^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 1,50325 \cdot 10^5.$$

5. Полная температура газа на выходе из эжектора

$$T_{03} = \frac{1}{n+1} \cdot T_{01} + \frac{n}{n+1} \cdot T_{02} = \frac{1}{0,5+1} \cdot 288 + \frac{0,5}{0,5+1} \cdot 288 = 288\,\text{K}.$$

6. Площадь среза сопла эжектирующего газа

$$F_1 = \frac{G_1 \cdot \sqrt{To_1}}{m \cdot Po_1 \cdot q(\lambda_1)} = \frac{0,2 \cdot \sqrt{288}}{0,0404 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1} = 4,2 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2.$$

7. Эжектирующее сопло может быть круглым, квадратным или прямоугольным. Все определяется конструктивными особенностями эжектора.

Диаметр сопла:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,2 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 23,13 \cdot 10^{-3}\ \text{м}.$$

8. Расход эжектируемого газа

$$G_2 = n \cdot G_1 = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1\ \text{кг/с}.$$

9. Площадь среза сопла эжектируемого газа

$$F_2 = \frac{G_2 \cdot \sqrt{T_{02}}}{m \cdot P_{02} \cdot q(\lambda_2)} = \frac{0,1 \cdot \sqrt{288}}{0,0404 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot 1} = 4,146 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2.$$

где $q(\lambda_2) = 1$, так как на оси эжектора вакуум и перепад давлений на срезе сопла сверхкритический.

10. Диаметр среза сопла эжектируемого газа

$$d_2 = \sqrt{\frac{4F_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,146 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 22,98 \cdot 10^{-3}\ \text{м}.$$

11. Температура эжектирующего газа после совершения работы над эжектируемым газом

$$T_{01P} = T_{01} \cdot [1 - (1 - \frac{1}{\Pi_{T_1}^{\frac{k-1}{k}}}) \cdot \eta_p^*] = 288 \cdot \{1 - [1 - (\frac{1,50325 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^5})^{0,286}] \cdot 0,92\} = 267,3\ \text{K}.$$

12. Температура эжектируемого газа после обмена работой с эжектирующим газом

$$T_{02C} = T_{02}[(\Pi_c^{*\frac{k-1}{k}} - 1) \cdot \frac{1}{\eta_c^*} + 1] = 288\{[(\frac{1,50325 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5})^{0,286} - 1]\frac{1}{0,85} + 1\} = 328,5\ \text{K}.$$

13. Газодинамическая функция давления газа на выходе из вихревого эжектора

$$\Pi(\lambda_3) = \frac{P_3}{P_{03}} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,50325 \cdot 10^5} = 0,63787,$$

где $P_3 = P_H$ – при истечении в атмосферу с докритическим перепадом давления или при регулируемой площади сопла.

14. Коэффициент скорости на выходе из эжектора

$$\lambda_3 = \sqrt{[1 - \Pi(\lambda_3)^{\frac{k-1}{k}}]\frac{k+1}{k-1}} = \sqrt{(1 - 0,63787^{0,286})\frac{1,4+1}{1,4-1}} = 0,800.$$

15. Расходная газодинамическая функция на выходе из эжектора

$$q(\lambda_3) = (\frac{k+1}{2})^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_3 (1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_3^2)^{\frac{1}{k-1}} = 1,2^{\frac{1}{1,4-1}} \cdot 0,8(1 - \frac{1,4-1}{1,4+1} \cdot 0,8^2)^{\frac{1}{1,4-1}} = 0,95164.$$

16. Площадь среза сопла на выходе из эжектора

$$F_3 = \frac{G_3\sqrt{T_{03}}}{m \cdot P_{03} \cdot q(\lambda_3)} = \frac{0,3\sqrt{288}}{0,0404 \cdot 1,50325 \cdot 10^5 \cdot 0,95164} = 880,91 \cdot 10^{-6}\ \text{м}^2.$$

17. Диаметр среза сопла на выходе из эжектора

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8{,}8091 \cdot 10^{-4}}{3{,}14}} = 33{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

18. Величина касательных напряжений между эжектирующим и эжектируемым газом

$$\tau = P_{01} - P_{03} = 2 \cdot 10^5 - 1{,}50325 \cdot 10^5 = 0{,}49675 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

19. Статическая температура газа на выходе из эжектора

$$T_3 = T_{03} \cdot \tau\,(\lambda_3) = 288 \cdot 0{,}8935 = 257{,}3 \text{ К},$$

где $\tau\,(\lambda_3) = f\,(\lambda_3) = 0{,}8335$.

20. Критическая скорость газа на выходе из эжектора

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

21. Скорость газа на выходе из эжектора

$$V_3 = \lambda_3 \cdot a_{кр3} = 0{,}8 \cdot 310{,}5 = 248{,}4 \text{ м/с}.$$

22. Средняя скорость движения эжектирующего газа от входа до выхода из эжектора

$$V_{ср} = \frac{V_1 + V_3}{2} = \frac{310{,}5 + 248{,}4}{2} = 279{,}45 \text{ м/с}.$$

23. Число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_3 = \frac{V_{ср} \cdot d_{1экв}}{\upsilon_1} = \frac{279{,}45 \cdot 23{,}15 \cdot 10^{-3}}{1{,}506 \cdot 10^{-5}} = 429566.$$

24. Коэффициент сопротивления трения (формула Блазиуса)

$$\xi_1 = \frac{0{,}3125}{\mathrm{Re}^{0{,}25}} = \frac{0{,}3125}{429566^{0{,}25}} = 1{,}22 \cdot 10^{-2}.$$

25. Плотность газа на входе в эжектор

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R \cdot T_1} = \frac{1{,}013 \cdot 10^5}{287 \cdot 234} = 1{,}5087 \text{ кг/м}^3.$$

$$T_1 = T_{01} \cdot \tau\,(\lambda_1) = 288 \cdot 0{,}8333 = 234.$$

26. Длина пути по вихревой линии

$$l = \frac{2 \cdot \tau \cdot d_3}{\rho_1 \cdot \xi_1 \cdot V_\phi^2} = \frac{2 \cdot 4{,}9675 \cdot 10^4 \cdot 33{,}5 \cdot 10^{-3}}{1{,}5087 \cdot 1{,}22 \cdot 10^{-2} \cdot 279{,}45^2} = 2{,}315 \text{ м}.$$

27. Внутренний диаметр смещения потоков

$$d_в = 1{,}1 \cdot d_2 = 1{,}1 \cdot 23{,}15 \cdot 10^{-3} = 25{,}3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

28. Длина одного шага

$$l_{1ш} = \pi \cdot d_в = 3{,}14 \cdot 25{,}3 \cdot 10^{-3} = 79{,}442 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

29. Число шагов движения потока газа

$$h = \frac{l}{l_{1ш}} = \frac{2{,}315}{79{,}442 \cdot 10^{-3}} = 29{,}1.$$

30. Линейная длина камеры смещения вдоль оси эжектора

$$l_э = h \cdot d_1 = 29{,}1 \cdot 23{,}13 \cdot 10^{-3} = 0{,}674 \text{ м}.$$

Приложение 2. Методика расчета термодинамических характеристик вихревого эжектора при известных геометрических размерах

Исходные данные:

P_{01} – полное давление эжектирующего газа, Па;
T_{01} – полная температура эжектирующего газа, К;
P_{02} – полное давление эжектируемого газа, Па;
T_{02} – полная температура эжектируемого газа, К;
k = 1,4 – показатель адиабаты воздуха;
C_D = 1003,5 (Дж/кг·К) – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

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

R = 287 – газовая постоянная воздуха;
η_p^* = 0,92 – КПД процесса расширения;
η_c^* = 0,85 – КПД процесса сжатия;
$F_1 = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ м^2 – площадь входного сопла эжектирующего газа;
$F_2 = 4{,}146 \cdot 10^{-4}$ м^2 – площадь входного сопла эжектируемого газа;
$F_3 = 8{,}81 \cdot 10^{-4}$ м^2 – площадь выходного сопла вихревого эжектора.
Определить: G_1, G_2, G_3, n, P_{03}, T_{03}.

Расчет

1. Расход эжектируемого воздуха

$$G_2 = \frac{m \cdot F_2 \cdot P_{02} \cdot q(\lambda_2)}{\sqrt{T_{02}}} = \frac{0{,}0404 \cdot 4{,}146 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 1}{\sqrt{288}} = 0{,}1 \text{ кг/с}.$$

2. Расход эжектирующего газа

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

3. $n = \frac{G_2}{G_1} = \frac{0{,}1}{0{,}2} = 0{,}5.$

4. Коэффициент a

$$a = \frac{\eta_p^*}{P_{01}^{*\frac{k-1}{k}}} - \frac{n}{\eta_c^*} \cdot \frac{1}{P_H^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{T_{02}}{T_{01}} = \frac{0{,}92}{(2 \cdot 10^5)^{0{,}286}} - \frac{0{,}5}{0{,}85} \cdot \frac{1}{(1{,}013 \cdot 10^5)^{0{,}286}} \cdot \frac{288}{288} = 6{,}2621 \cdot 10^{-3}.$$

5. Коэффициент b

$$b = n \cdot (\frac{1}{\eta_c^*} + \eta_p^*) \cdot \frac{T_{02}}{T_{01}} = 0{,}5 \cdot (\frac{1}{0{,}5} + 0{,}92) \cdot \frac{288}{288} = 1{,}048235.$$

6. Коэффициент c

$$c = (1+n) \cdot \frac{T_{02}}{T_{01}} \cdot \eta_p^* P_H^{\frac{k-1}{k}} = (1+0{,}5) \cdot \frac{288}{288} \cdot 0{,}92 \cdot (1{,}013 \cdot 10^5)^{0{,}286} = 37{,}28327.$$

7. Полное давление газа на выходе из вихревого эжектора

$$P_{03} = (\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \cdot a \cdot c}}{2a})^{\frac{k}{k-1}} = (\frac{-1{,}048235 + \sqrt{1{,}048235^2 + 4 \cdot 6{,}2621 \cdot 10^{-3} \cdot 37{,}28327}}{2 \cdot 6{,}2621 \cdot 10^{-3}})^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}} = 1{,}50325 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

8. Полная температура газа на выходе из эжектора

$$T_{03} = \frac{1}{n+1} T_{01} + \frac{n}{n+1} T_{02} = \frac{1}{0{,}5+1} 288 + \frac{0{,}5}{0{,}5+1} 288 = 288 \text{ К}.$$

9. Газодинамическая функция давления газа на выходе из вихревого эжектора

$$\Pi(\lambda_3) = \frac{P_H}{P_{03}} = \frac{1{,}013 \cdot 10^5}{1{,}50325 \cdot 10^5} = 0{,}63787.$$

10. Коэффициент скорости на выходе из эжектора

$$\lambda_3 = \sqrt{[1 - \Pi(\lambda_3)^{\frac{k-1}{k}}] \frac{k+1}{k-1}} = \sqrt{(1 - 0{,}63787^{0{,}286}) \frac{1{,}4+1}{1{,}4-1}} = 0{,}80.$$

11. Расходная газодинамическая функция на выходе из эжектора

$$q(\lambda_3) = (\frac{k+1}{2})^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_3 \cdot (1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_3^2)^{\frac{1}{k-1}} = 1{,}2^{\frac{1}{1{,}4-1}} \cdot 0{,}8 \cdot (1 - \frac{1{,}4-1}{1{,}4+1} \cdot 0{,}8^2)^{\frac{1}{1{,}4-1}} = 0{,}95164.$$

12. Расход газа на выходе из эжектора

$$G_3 = \frac{m \cdot F_3 \cdot P_{03} \cdot q(\lambda_3)}{\sqrt{T_{03}}} = \frac{0{,}0404 \cdot 8{,}81 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}50325 \cdot 10^5 \cdot 0{,}95164}{\sqrt{288}} = 0{,}3 \text{ кг/с}.$$

Об авторах

Кузнецов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация.
Область научных интересов: механика сплошной среды, вихревая труба, вихревой эжектор, струйный эжектор, труба Гартмана – Шпренгера, теория газотурбинных двигателей.

Макаров Владимир Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация.
Область научных интересов: вихревые течения жидкости и газа.

Шандер Александра Юрьевна – старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация.
Область научных интересов: вихревые течения жидкости и газа и их применение.

Fundamentals of the working process of a vortex tube operating in the vacuum pump (vortex ejector) mode

Kuznetsov V. I., Makarov V. V., Shander A. Yu.

Federal State Educational Institution of Higher Education Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

The physical model of work performed by a vortex tube operating in the vacuum pump (vortex ejector) mode is refined to consider the amount of energy transferred from the ejecting gas flow to the gas flow being ejected. A closed system of equations is formed to describe the working process of the vortex ejector. Based on this system of equations, two basic calculation methods for the vortex ejector are elaborated. These are the method of calculation of basic geometric dimensions and the method of performance calculation with known geometric dimensions. The influence of viscosity on the energy exchange in the vortex ejector is shown. Calculations and experimental data are in good agreement.

Keywords: vortex tube, vacuum pump, vortex ejector, viscosity, tangential stresses, angular velocity gradient.

Information about the authors

Kuznetsov Viktor Ivanovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Aviation and Rocket Engineering, Federal State Educational Institution of Higher Education Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation.
Science research interests: continuum mechanics, vortex tube, vortex ejector, jet ejector, Hartmann-Sprenger tube, gas turbine engine theory.

Makarov Vladimir Vyacheslavovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Aviation and Rocket Engineering, Federal State Educational Institution of Higher Education Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation.
Science research interests: gas and liquid vortex flows.

Shander Aleksandra Yurievna – Senior Lecturer, Department of Aviation and Rocket Engineering, Federal State Educational Institution of Higher Education Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation.
Science research interests: gas and liquid vortex flows and their application.