

УДК 62-97/-98

# Математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором

**А.А. Очков, М.И. Хамади**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Mathematical model of the process of gas pumping by a multi-nozzle supersonic vacuum ejector

**A.A. Ochkov, M.I. Hamadi**

Bauman Moscow State Technical University

Вакуумные эжекторы получили распространение в различных отраслях промышленности благодаря многим достоинствам. Однако классические односопловые конфигурации эжекторов имеют недостатки, ограничивающие возможность их использования в составе различных установок. Разработана математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором. Приведены расчетная схема, принятые допущения и основные расчетные зависимости, используемые в математической модели рабочего процесса многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора. Разработана программа расчета скорости действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора.

**EDN:** UWGLHV, <https://elibrary/uwglhv>**Ключевые слова:** многосопловой сверхзвуковой эжектор, математическая модель, рабочие процессы эжектора, скорость действия эжектора

Currently, vacuum ejectors are used in various industries due to a number of advantages. However, classic single-nozzle ejector configurations have a number of disadvantages that limit their application in various installations. A mathematical model of the gas pumping process by a multi-nozzle supersonic vacuum ejector has been developed. The calculation scheme, accepted assumptions and main calculation dependencies used in the mathematical model of the working process of a multi-nozzle supersonic ejector are presented, and also a program for calculating the pumping speed of a multi-nozzle supersonic vacuum ejector and block diagram of this program have developed. Conclusions have been made.

**EDN:** UWGLHV, <https://elibrary/uwglhv>**Keywords:** multi-nozzle supersonic ejector, mathematical model, ejector working processes, pumping speed of ejector

Газовые эжекторы (далее эжекторы) классической конфигурации получили широкое распространение в промышленности благодаря надежности, простоте конструкции и экономичности. Принцип действия эжектора заключается в передаче импульса количества движения высоконапорного (рабочего) газа низконапорному (откачиваемому) газу в про-

цессе их смешения и движения в направлении откачки.

Эжекторы находят применение в вакуумной технике, энергетике, химической, нефтехимической и газовой отраслях промышленности. В теплоэнергетике их используют для создания требуемого перепада давлений в конденсаторах паротурбинных установок (что повышает ко-

эфицент полезного действия турбин и снижает расходы на охлаждение), в авиации и космической технике — в установках создания разреженных условий, имитирующих большие высоты и условия космоса [1–9].

Однако эжекторы классической конфигурации имеют недостатки, снижающие эффективность и ограничивающие возможность их применения [1, 3, 5–7]. К основным недостаткам эжекторов относятся:

- ограниченная эффективность при изменении рабочих параметров (давления или температуры входящих газов), так как классические вакуумные эжекторы проектируют для конкретных условий эксплуатации, и при их изменении эффективность снижается;
- высокие потери кинетической энергии при смешении потоков рабочего (активного — АГ) и откачиваемого (эжектируемого — ЭГ) газов;
- относительно большие габаритные размеры вследствие того, что длина камеры смешения (КС) может достигать нескольких метров из-за низкой интенсивности процесса смешения потоков АГ и ЭГ.

Эти недостатки делают актуальной разработку новых технических решений в области расчета и конструирования эжекторов, которые смогут их компенсировать. Улучшенное управление газовым потоком, оптимизация параметров по нескольким критериям и использование многосопловых конфигураций позволят повысить эффективность и расширить область применения эжекторов в различных отраслях промышленности [10–16].

Повышение эффективности эжектора обеспечивает сокращение расходов на эксплуатацию и уменьшение его габаритных параметров, делает рабочие процессы более стабильными и экономически выгодными. С учетом возрастающих требований к энергоэффективности, надежности и экологичности повышение эффективности эжектора становится важной задачей для многих отраслей промышленности.

В силу принципа действия эжектора одним из перспективных способов повышения его эффективности является увеличение количества сопел АГ и изменение их геометрических параметров для достижения потоком АГ сверхзвуковой скорости. Такой способ значительно увеличивает интенсификацию процесса смешения АГ и ЭГ, что позволяет уменьшить габаритные размеры эжектора.

Многосопловые сверхзвуковые эжекторы обладают повышенной эффективностью благодаря использованию нескольких сопел, обеспечивающих увеличение скорости откачки и улучшение показателей энергоэффективности систем, в состав которых входят эжекторы. Однако существующие математические модели рабочих процессов эжектора [1, 7] в составе подобных систем являются недостаточно точными.

Цель статьи — разработка математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором.

В классической конструкции эжектора АГ подается через сопло, где он ускоряется до высокой скорости. Поток АГ, двигаясь в направлении КС, передает импульс количеству движения потоку ЭГ, вследствие чего в КС формируется турбулентный поток смеси газов (СГ). Последний направляется в диффузор, где его кинетическая энергия преобразуется в статическое давление в процессе торможения. Таким образом, выходящий из эжектора поток имеет большее давление, чем давление потока ЭГ на входе.

Основными параметрами эжектора являются коэффициент эжекции  $K$  и степень повышения давления  $\varepsilon$ , вычисляемые по выражениям

$$K = G_{\text{э}}/G_{\text{а}}; \quad \varepsilon = p_3/p_{\text{э}0},$$

где  $G_{\text{э}}$  и  $G_{\text{а}}$  — массовые расходы ЭГ и АГ;  $p_3$  — давление СГ на выходе из эжектора,  $p_{\text{э}0}$  — давление ЭГ на входе в эжектор.

Основные параметры потока, определяемые на выходе из эжектора, — давление, температура и скорость течения — зависят от его геометрических параметров и условий работы, что делает необходимым математическое моделирование рабочих процессов и расчет геометрических параметров для достижения требуемых характеристик.

В состав эжектора (рис. 1) входят сопло АГ 1, КС 2, приемная камера 3 и диффузор 4. Из

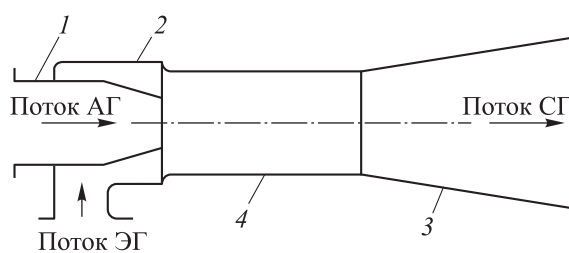


Рис. 1. Схема эжектора

сопла могут истекать потоки с дозвуковой, звуковой и сверхзвуковой скоростями в зависимости от его формы, термодинамических параметров потока и режимов работы эжектора.

Рассмотрим эжектор, имеющий сверхзвуковые сопла АГ, расположенные параллельно друг другу. Геометрическая форма и длина КС могут быть разными. Для сверхзвуковых эжекторов рекомендовано использовать такие геометрические параметры КС, при которых отношение длины КС к ее диаметру находится в диапазоне 10...18 [1, 3–6]. На выходе из КС образуется турбулентный дозвуковой поток СГ, характеризующийся неравномерностью по сечению осредненных по времени параметров и интенсивными пульсациями. За КС расположен диффузор.

Расчетная схема пятисоплового сверхзвукового вакуумного эжектора приведена на рис. 2, где  $\alpha$  — угол расширения сверхзвуковой струи. Сверхзвуковые сопла расположены параллель-

но друг другу и имеют одинаковые геометрические параметры. Одно из сопел размещено на оси эжектора, остальные четыре — параллельно ему и равноудаленно по диаметру входа АГ. На расчетной схеме также обозначены:

- входное сечение эжектора (0–0): АГ под высоким давлением поступает через сверхзвуковое сопло в КС, ЭГ также направляется в КС;
- сечение на входе в КС (1–1): АГ выходит из сверхзвуковых сопел в цилиндрическую КС;
- участок взаимодействия потоков АГ и ЭГ, расположенный между сечениями 1–1 и 4–4: струя АГ, расширяясь, поджимает поток ЭГ, ускоряя его;
- сечение запирания (4–4): статические давления струй АГ и ЭГ сравниваются, скорость течения потока ЭГ достигает скорости звука;
- участок смешения АГ и ЭГ, расположенный между сечениями 4–4 и 2–2: после выравнивания статических давлений потоки АГ и ЭГ начинают смешиваться;

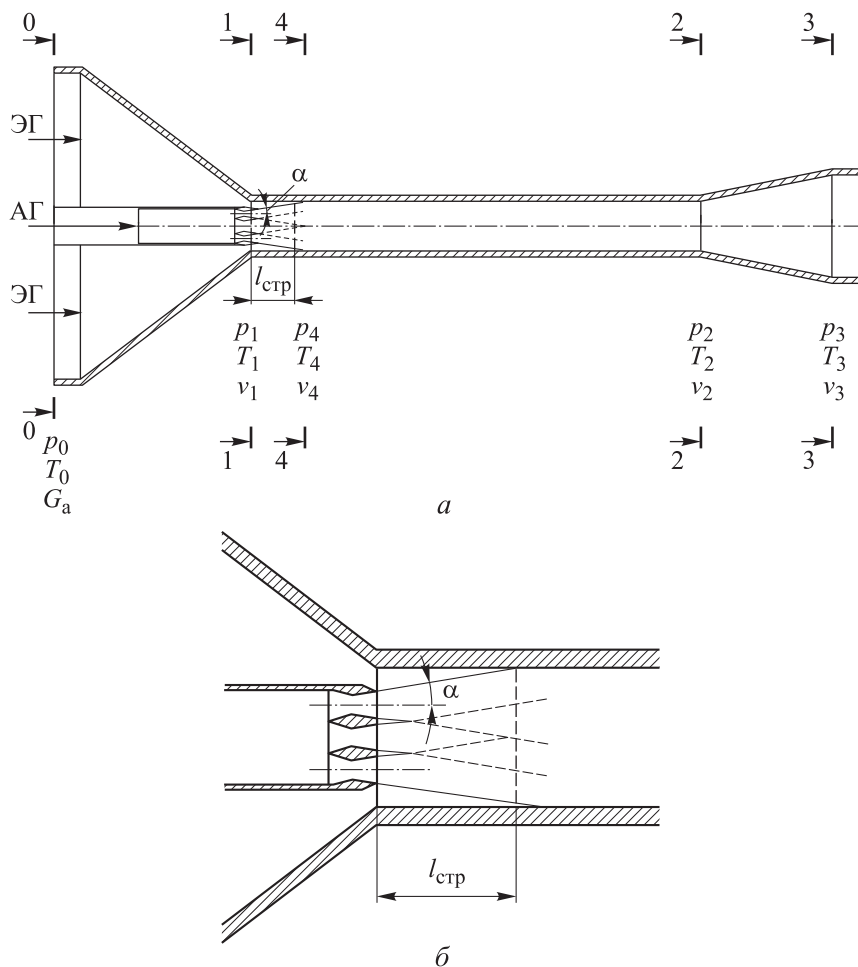


Рис. 2. Расчетная схема пятисоплового сверхзвукового вакуумного эжектора (а) и увеличенный вид сечения запирания (б)

- выходное сечение КС (2–2): СГ направляется в диффузор;
- диффузор (участок между сечениями 2–2 и 3–3): поток СГ выходит из КС и проходит через диффузор, где скорость его течения уменьшается, а статическая составляющая давления увеличивается;
- выходное сечение эжектора (3–3): СГ истекает из эжектора.

При разработке математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором приняты следующие допущения:

- АГ, ЭГ и СГ в выходном сечении КС описываются уравнением состояния идеального газа;
- стенки сопел, КС и диффузора — нетеплопроводные и газонепроницаемые;
- течение газа в соплах эжектора — одномерное;
- на участке между сечениями 1–1 и 4–4 (см. рис. 2) АГ и ЭГ не смешиваются и имеют постоянные полные давления, температуры торможения и расходы;
- сверхзвуковые потоки, образованные сверхзвуковыми соплами, не взаимодействуют;
- распределение АГ между сверхзвуковыми соплами — равномерное.

Таким образом, будем считать, что во входном сечении КС потоки АГ и ЭГ перед смешением имеют равномерные профили скоростей течения и температур, а в выходном сечении КС вследствие незавершенности процесса смешения образуется турбулентный квазистационарный поток с неравномерным распределением параметров по сечению [1, 3–6].

Для определения параметров СГ в выходном сечении эжектора выведены уравнения эжекции, аналогичные приведенным в работах [1, 5, 6].

Необходимо найти быстроту действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора при следующих заданных параметрах: полное давление АГ на входе в эжектор  $p_{a0}$ ; полное давление ЭГ на входе в эжектор  $p_{э0}$ ; геометрические параметры эжектора — диаметры входных патрубков АГ  $d_{вх.а}$  и ЭГ  $d_{вх.э}$ ; диаметр КС  $d_{КС}$ ; длина КС  $l_{КС}$ ; род газов; полные температуры газов на входе  $T_0$  и выходе  $T_3$ ; давление газа в выходном сечении эжектора  $p_3$ .

Алгоритм определения быстроты действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора включает в себя следующие шаги:

- задание количества сверхзвуковых сопел;
- определение геометрических параметров сверхзвуковых сопел и АГ на выходе из них;
- нахождение параметров АГ и ЭГ в сечении 4–4 (см. рис. 2);
- определение быстроты действия эжектора.

В большей части научных исследований связь параметров струй во входном и выходном сечениях сверхзвуковых сопел приведена в предположении изэнтропического стационарного и одномерного течения компонентов в них, что обеспечивает достаточно хорошее согласование результатов расчета и эксперимента с помощью введения различных коэффициентов потерь. Поэтому использован классический метод расчета сверхзвукового сопла, описанный в публикации [17].

Рассмотрим случай, когда сверхзвуковые сопла имеют одинаковые геометрические параметры, для чего зададим параметры сопла: угол входа  $\alpha_{вх}$ , угол раскрытия  $\alpha_{вых}$  и отношение длины участка от входа в сопло до критического сечения  $l/l_{кр}$ .

Расчет будем проводить в следующей последовательности. *Вычисляем диаметр сопла в критическом сечении*

$$d_{кр} = \frac{d_1}{1 + 2r \operatorname{tg} \alpha_c},$$

где  $d_1$  — диаметр входного сечения сопла;  $r$  — отношение длины входного участка сопла  $l_1$  к его диаметру в критическом сечении;  $\alpha_c$  — угол сужения сопла.

Для нахождения возможного числа сверхзвуковых сопел  $N_c$ , которые можно использовать во входном патрубке АГ с диаметром  $d_{вх.а}$  без изменения геометрических параметров эжектора, будем использовать выражение

$$d_1 = \frac{D_{a0} - 2h_{ст}(N_c - 1)}{N_c},$$

где  $D_{a0}$  — внутренний диаметр входного патрубка АГ;  $h_{ст}$  — толщина стенки сверхзвукового сопла.

*Определяем параметры газа в критическом сечении сопла для воздуха:*

- скорость звука

$$a_{кр} = 18,3\sqrt{T_{a0}};$$

- температура

$$T_{кр} = 0,8333T_{a0};$$

- давление

$$p_{кр} = p_{a0} 0,5283;$$

- плотность

$$\rho_{кр} = \frac{p_{кр}}{RT_{кр}};$$

- массовый расход

$$m_{кр}(\alpha_c) = \frac{S_{кр}(\alpha_c) B p_{a0}}{\sqrt{T_{a0}}}.$$

Здесь  $T_{a0}$  — температура АГ на входе в эжектор;  $R$  — газовая постоянная;  $S_{кр}$  — площадь критического сечения сопла;  $B$  — коэффициент,

$$B = \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}} \sqrt{\frac{n}{n+1}},$$

где  $n$  — показатель адиабаты газа.

Вычисляем параметры газа во входном сечении сопла для воздуха:

- приведенный массовый расход

$$q_1(\alpha_c) = \frac{S_{кр}(\alpha_c)}{S_1};$$

- приведенная скорость

$$\lambda_1 = \lambda(q_{1-1}) + [\lambda(q_{1+1}) - \lambda(q_{1-1})] \frac{q_1 - q_{1-1}}{q_{1+1} - q_{1-1}};$$

- температура

$$T_1 = \tau_1 T_{a0};$$

- давление

$$p_1 = \tau_1^{3,5} p_{a0};$$

- скорость течения

$$v_1 = \lambda_1 a_{кр};$$

- скорость звука

$$a_1 = 20,05 \sqrt{T_1};$$

- плотность

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1};$$

- число Маха

$$M_1 = \frac{v_1}{a_1}.$$

Здесь  $S_1$  — площадь входного сечения сопла;  $\lambda$  — приведенная скорость;  $q_{1-1}$  — табличное значение приведенного массового расхода газа, предшествующее расчетному  $q_1$ ;  $q_{1+1}$  — таб-

личное значение приведенного массового расхода газа, следующее за расчетным  $q_1$ ;  $\tau_1$  — газодинамическая функция температуры торможения,

$$\tau_1 = 1 - \frac{\lambda_1^2}{6}.$$

Определяем параметры газа в выходном сечении сопла для воздуха:

- приведенная скорость

$$\lambda_2 = \sqrt{6(1 - \tau_2)};$$

- удельный массовый расход

$$q_2 = 1,577 \lambda_2 \tau_2^{3,5};$$

- температура

$$T_2 = \tau_2 T_{a0};$$

- скорость течения

$$v_2 = \lambda_2 a_{кр};$$

- скорость звука

$$a_2 = 20,05 \sqrt{T_2};$$

- число Маха

$$M_2 = v_2 / a_2,$$

где  $\tau_2 = (p_2/p_{a0})^{1/3,5}$ .

Вычисляем геометрические параметры сверхзвукового сопла:

- площадь выходного сечения

$$S_2(\alpha_c) = \frac{S_{кр}(\alpha_c)}{q_2};$$

- диаметр выходного сечения

$$d_2(\alpha_c) = 2 \sqrt{\frac{S_2(\alpha_c)}{\pi}};$$

• длина участка от критического сечения сверхзвукового сопла до его выходного сечения

$$l_2(\alpha_c) = \frac{d_2(\alpha_c) - d_{кр}(\alpha_c)}{2 \operatorname{tg} \beta_c},$$

где  $\beta_c$  — угол расширяющейся обечайки сопла.

Значения давления, температуры и скорости АГ на входе в КС (см. рис. 2, сечение 1-1) соответствуют таковым в выходном сечении сверхзвукового сопла.

Процесс, протекающий на участке между входом в КС и сечением запираения можно описать следующим образом: сверхзвуковые струи АГ, обладая давлением, превышающим давление

ЭГ, выходят из сверхзвуковых сопел в цилиндрическую КС. Расширяясь, струи АГ поджимают дозвуковой поток ЭГ, который начинает ускоряться по сужающемуся каналу, ограниченному стенкой КС и границей расширяющегося потока АГ. Расширение продолжается до момента выравнивания статических давлений обоих потоков. В точке, где площадь струи АГ достигает максимума на расстоянии  $l_{стр}$  от среза сопла, фиксируются минимальное статическое давление и максимальная скорость течения ЭГ, близкая к скорости звука [1].

Определяем параметры в сечении запирания: давление ЭГ, приведенную скорость течения АГ  $\lambda_{a4}$  и площадь сечения, занимаемую АГ,  $F_{a4}$ .

Давление ЭГ в сечении запирания

$$p_{э4} = p_{э1}^* \left( \frac{2}{n_э + 1} \right)^{\frac{n_э}{n_э - 1}},$$

где  $p_{э1}^*$  — полное давление ЭГ в сечении 1-1;  $n_э$  — показатель адиабаты ЭГ.

Для нахождения приведенной скорости течения АГ  $\lambda_{a4}$  воспользуемся следующим выражением, описывающим связь коэффициентов потерь скорости течения АГ  $\nu_a$  и ЭГ  $\nu_э$ :

$$p_{a1}^* \left( 1 - \frac{n_a - 1}{n_a + 1} \lambda_{a1}^2 \right)^{\frac{n_a}{n_a + 1}} = p_{э1}^* \left( 1 - \frac{n_э - 1}{n_э + 1} \lambda_{э1}^2 \right)^{\frac{n_э}{n_э + 1}},$$

где  $p_{a1}^*$  — полное давление АГ в сечении 1-1;  $n_a$  — показатель адиабаты АГ;  $\lambda_{a1}$  и  $\lambda_{э1}$  — приведенные скорости АГ и ЭГ в сечении 1-1.

Полные давления АГ и ЭГ в сечении 1-1

$$p_{a1}^* = p_{a0}^* \nu_a; \quad p_{э1}^* = p_{э0}^* \nu_э,$$

где  $p_{a0}^*$  и  $p_{э0}^*$  — полные давления АГ и ЭГ в сечении 0-0.

Для определения приведенной скорости течения АГ в сечении запирания  $\lambda_{a4}$  и приведенной скорости течения ЭГ на входе в КС  $\lambda_{э1}$  применяем блок численного решения со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} & \alpha_{пл} \frac{p_{э1}^* / A^{\frac{n_э}{n_э - 1}} \lambda_{э1} A^{\frac{1}{n_э - 1}}}{p_{a1}^* \lambda_{a1} C^{\frac{1}{n_a - 1}}} \left( \lambda_{э1} + \frac{1}{\lambda_{э1}} - 2 \right) - \\ & - \left[ \lambda_{a4} + \frac{1}{\lambda_{a1}} - \left( \lambda_{a1} + \frac{1}{\lambda_{a1}} \right) \right] + \\ & + \frac{(1 + \alpha_{пл}) \delta \left( p_{э1}^* / A^{\frac{n_э}{n_э - 1}} \right) A^{\frac{1}{n_э - 1}}}{(1 - \delta) p_{a1}^* C^{\frac{1}{n_a - 1}}} = 0; \end{aligned}$$

$$\frac{1 + \alpha_{пл}}{1 - \delta} = \frac{\lambda_{a1} C^{\frac{1}{n_a - 1}}}{\lambda_{a4} D^{\frac{1}{n_a - 1}}} + \alpha_{пл} \lambda_{э1} A^{\frac{1}{n_э - 1}} \left( \frac{n_э + 1}{2} \right)^{\frac{1}{n_э - 1}};$$

$$\lambda_{a4} = \sqrt{\frac{n_a + 1}{n_a - 1} \left\{ 1 - \frac{\left[ \left( p_{э1}^* / A^{\frac{n_э}{n_э - 1}} \right) \left( \frac{2}{n_э + 1} \right)^{\frac{n_э}{n_э - 1}} \right]^{\frac{n_a - 1}{n_a}}}{p_{a1}^*} \right\}},$$

где  $\alpha_{пл}$  — отношение площади выходного сечения сопла ЭГ к площади выходного сечения сопла АГ;  $\delta$  — отношение площади торцов сопел АГ к площади КС в сечении 1-1;

$$A = 1 - \frac{n_э - 1}{n_э + 1} \lambda_{э1}^2; \quad C = 1 - \frac{n_a - 1}{n_a + 1} \lambda_{a1}^2;$$

$$D = 1 - \frac{n_a - 1}{n_a + 1} \lambda_{a4}^2.$$

Схемы сечения запирания пятисоплового эжектора приведены на рис. 3, где заштрихованная область обозначает площадь сечения, занимаемую АГ.

Для определения площади сечения, занимаемой АГ,  $F_{a4}$  использованы приведенные ранее допущения, из соотношения между площадями из уравнений сохранения расхода АГ  $F_{a1}$  и ЭГ  $F_{э1}$  на начальном участке КС до сечения запирания:

$$\rho_a^* \varepsilon(\lambda_{a1}) a_{кр.а} \lambda_{a1} F_{a1} = \rho_a^* \varepsilon(\lambda_{a4}) a_{кр.а} \lambda_{a4} F_{a4};$$

$$\rho_э^* \varepsilon(\lambda_{э1}) a_{кр.э} \lambda_{э1} F_{э1} = \rho_э^* \varepsilon(\lambda_{э4}) a_{кр.э} \lambda_{э4} F_{э4},$$

где  $\rho_a^*$  и  $\rho_э^*$  — плотности АГ и ЭГ, соответствующие полным давлениям АГ и ЭГ;  $a_{кр.а}$  — критическая скорость АГ;  $F_{э4}$  — площадь сечения, занимаемая ЭГ,  $F_{э4} = F_4 - F_{a4}$  ( $F_4$  — площадь сечения запирания эжектора).

Отсюда получаем

$$F_{a4} = \frac{\lambda_{a1} \left( 1 - \frac{n_a - 1}{n_a + 1} \lambda_{a1}^2 \right)^{\frac{1}{n_a - 1}}}{\lambda_{a4} \left( 1 - \frac{n_a - 1}{n_a + 1} \lambda_{a4}^2 \right)^{\frac{1}{n_a - 1}}}.$$

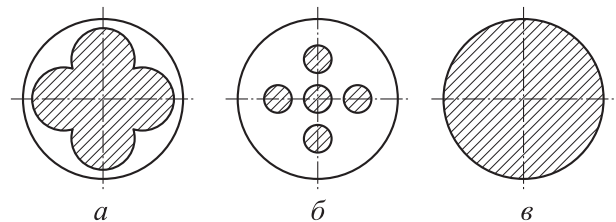


Рис. 3. Схемы сечения запирания пятисоплового эжектора

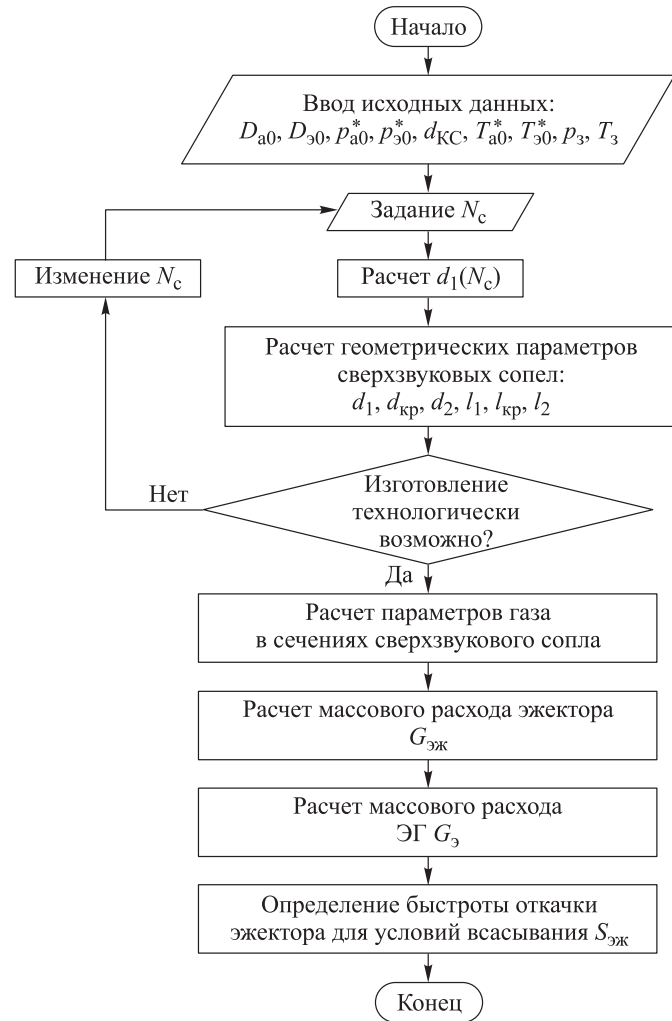


Рис. 4. Блок-схема программы расчета быстроты действия многосоплового сверхзвукового вакуумного эжектора

На рис. 3, а показан случай, когда в процессе расширения сверхзвуковые струи АГ объединились в одну струю. На рис. 3, б приведен случай, когда статические давления АГ и ЭГ сравнялись до того, как сверхзвуковые струи АГ успели расшириться настолько, чтобы объединиться в одну (см. рис. 3, а)

Если  $F_4 \leq F_{a4}$  (рис. 3, в), то реализован режим запириания эжектора, при котором расширяющаяся струя АГ достигает стенок КС и для протекания ЭГ не остается площади в сечении запириания. Для определения расхода ЭГ использована зависимость при приведенной скорости течения ЭГ  $\lambda_{э4} = 1$  [1]

$$G_э = \rho_{э4} \lambda_{э4} a_{кр.э} F_{э4} = \frac{p_{э1}^* F_{э4}}{\sqrt{R_э T_э^*}} \sqrt{n_э \left( \frac{2}{n_э + 1} \right)^{\frac{n_э + 1}{n_э - 1}}},$$

где  $\rho_{э4}$  — плотность ЭГ в сечении запириания;  $a_{кр.э}$  — критическая скорость ЭГ;  $R_э$  — газо-

вая постоянная ЭГ;  $T_э^*$  — температура торможения ЭГ.

Зная массовый расход ЭГ  $G_э$  и его плотность в сечении 0–0  $\rho_э$ , находим быстроту действия эжектора

$$S_{эж} = G_э / \rho_э.$$

Для предложенной математической модели процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором разработана программа расчета быстроты его действия, блок-схема которой приведена на рис. 4.

Разработанная математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором позволяет определять быстроту его действия, коэффициент эжекции, а также геометрические параметры и число сверхзвуковых сопел АГ для заданных полных давлений ЭГ и АГ во вход-

ном сечении эжектора и геометрических параметров вакуумной камеры и КС с учетом рода ЭГ и АГ.

## Выводы

1. Разработана математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором, позволяющая проектировать такие устройства для применения в различных системах.

2. Многосопловая сверхзвуковая конфигурация эжектора значительно повышает интенсификацию процесса смешения АГ и ЭГ [1, 3–7, 10, 12], что увеличивает энергоэффективность систем, содержащих такой эжектор, и уменьшает его габаритные размеры.

3. В дальнейшем математическую модель можно использовать для оптимизации геометрических параметров вакуумного эжектора с целью обеспечения наилучших параметров откачки определенных ЭГ и АГ.

## Литература

- [1] Цегельский В.Г. *Струйные аппараты*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 789 с.
- [2] Jieli Luo, Guangming Chen et al. Analysis on the optimal mixing pressure and efficiency limit of an ideal ejector. *Energy Reports*, vol. 7, 2021, pp. 4335–4347, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.024>
- [3] Соколов Е.Я., Зингер Н.М. *Струйные аппараты*. Москва, Энергия, 1970. 287 с.
- [4] Фролов Е.С., ред. *Вакуумная техника*. Москва, Машиностроение, 1985. 359 с.
- [5] Христианович С.А. *О расчете эжектора*. В: *Промышленная аэродинамика*. Москва, Изд-во БНТ НКАП, 1944, с. 3–17.
- [6] Миллионщиков М.Д., Рябинков Г.М. *Газовые эжекторы больших скоростей*. В: Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. Москва, БНИ ЦАГИ, 1961, с. 5–32.
- [7] Мальков В.М., Емельянова А.В. Эффективный многосопловой эжектор: влияние геометрических параметров рабочего канала на его характеристики. *Аэрокосмическая техника и технологии*, 2023, т. 1, № 1, с. 131–148.
- [8] Yuetong Shu, Jia Yan. Thermodynamic modeling and performance optimization of transcritical CO<sub>2</sub> dual-evaporator refrigeration system enhanced with ejectors. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123433>
- [9] Sadeghiseraji, Jaber & Garcia-Vilchez, Mercè & Castilla, Robert & Raush, Gustavo. Recent Advances in Numerical Simulation of Ejector Pumps for Vacuum Generation—A Review. *Energies*, vol. 17, p. 29, doi: [10.3390/en17174479](https://doi.org/10.3390/en17174479)
- [10] Yadav, Surendra and Pandey, Krishna and Gupta, Rajat. Recent advances on principles of working of ejectors: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020, vol. 45, p. 9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.736>
- [11] Zhu Y., Cai W., Wen C. et al. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Appl. Therm. Eng.*, 2009, vol. 29, no. 5–6, pp. 898–905, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.04.025>
- [12] Bourhan M. Tashtoush, Moh'd A. Al-Nimr, Mohammad A. Khasawneh. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy*, vol. 240, 2019, pp. 138–172, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185>
- [13] Gerald Singer, Rafael Pinsker et al. Ejector validation in proton exchange membrane fuel cells: A comparison of turbulence models in computational fluid dynamics (CFD) with experiment. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 61, 2024, pp. 1405–1416, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.365>
- [14] Wei Lu, Hongjie Chen. Design of cylindrical mixing chamber ejector according to performance analyses. *Energy*, vol. 164, 2018, pp. 594–601, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.025>
- [15] Hadi Samsam-Khayani, Sang Youl Yoon et al. Experimental and numerical study on low-temperature supersonic ejector. *International Journal of Thermofluids*, 2023, vol. 20, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100407>
- [16] Giorgio Besagni, Nicolò Cristiani et al. Computational fluid-dynamics modelling of supersonic ejectors: Screening of modelling approaches, comprehensive validation and assess-



ment of ejector component efficiencies. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116431>

[17] Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика*. Москва, Наука, 1976. 824 с.

## References

- [1] Tsegelskiy V.G. *Struynnye apparaty* [Jet apparatuses]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 789 p. (In Russ.).
- [2] Jieli Luo, Guangming Chen et al. Analysis on the optimal mixing pressure and efficiency limit of an ideal ejector. *Energy Reports*, vol. 7, 2021, pp. 4335–4347, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.024>
- [3] Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struynnye apparaty* [Jet apparatuses]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 287 p. (In Russ.).
- [4] Frolov E.S., ed. *Vakuumnaya tekhnika* [Vacuum technique]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 359 p. (In Russ.).
- [5] Khristianovich S.A. *O raschete ezhektora* [On calculation of an ejector]. V: *Promyshlennaya aerodinamika* [In: Industrial aerodynamics]. Moscow, Izd-vo BNT NKAP Publ., 1944, pp. 3–17. (In Russ.).
- [6] Millionshchikov M.D., Ryabinkov G.M. *Gazovye ezhektory bolshikh skorostey*. V: *Sbornik rabot po issledovaniyu sverkhzvukovykh gazovykh ezhektorov*. Moscow, BNI TsAGI, 1961, pp. 5–32. (In Russ.).
- [7] Malkov B.M., Emelyanova A.V. Efficient multi-nozzle ejector: the impact of working channel configuration on its performance. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Aerospace Engineering and Technology], 2023, vol. 1, no. 1, pp. 131–148. (In Russ.).
- [8] Yuetong Shu, Jia Yan. *Thermodynamic modeling and performance optimization of transcritical CO<sub>2</sub> dual-evaporator refrigeration system enhanced with ejectors*. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123433>
- [9] Sadeghiseraji, Jaber & Garcia-Vilchez, Mercè & Castilla, Robert & Raush, Gustavo. Recent Advances in Numerical Simulation of Ejector Pumps for Vacuum Generation—A Review. *Energies*, vol. 17, p. 29, doi: 10.3390/en17174479
- [10] Yadav, Surendra and Pandey, Krishna and Gupta, Rajat. Recent advances on principles of working of ejectors: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020, vol. 45, p. 9, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.736>
- [11] Zhu Y., Cai W., Wen C. et al. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Appl. Therm. Eng.*, 2009, vol. 29, no. 5–6, pp. 898–905, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.04.025>
- [12] Bourhan M. Tashtoush, Moh'd A. Al-Nimr, Mohammad A. Khasawneh. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy*, vol. 240, 2019, pp. 138–172, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185>
- [13] Gerald Singer, Rafael Pinsker et al. Ejector validation in proton exchange membrane fuel cells: A comparison of turbulence models in computational fluid dynamics (CFD) with experiment. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 61, 2024, pp. 1405–1416, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.365>
- [14] Wei Lu, Hongjie Chen. Design of cylindrical mixing chamber ejector according to performance analyses. *Energy*, vol. 164, 2018, pp. 594–601, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.025>
- [15] Hadi Samsam-Khayani, Sang Youl Yoon et al. Experimental and numerical study on low-temperature supersonic ejector. *International Journal of Thermofluids*, 2023, vol. 20, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100407>
- [16] Giorgio Besagni, Nicolò Cristiani et al. Computational fluid-dynamics modelling of supersonic ejectors: Screening of modelling approaches, comprehensive validation and assessment of ejector component efficiencies. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116431>
- [17] Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 824 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.12.2024

## Информация об авторах

**ОЧКОВ Андрей Андреевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aochkov@bmstu.ru).

**ХАМАДИ Михаил Искандерович** — аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mih@bmstu.ru).

## Information about the authors

**OCHKOV Andrey Andreevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Vacuum and Compressor Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aochkov@bmstu.ru).

**HAMADI Mikhail Iskanderovich** — Postgraduate, Department of Vacuum and Compressor Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., 5, Bldg. 5, Block 1, e-mail: mih@bmstu.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Очков А.А., Хамади М.И. Математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 12, с. 60–69.

### Please cite this article in English as:

Ochkov A.A., Hamadi M.I. Mathematical model of the process of gas pumping by a multi-nozzle supersonic vacuum ejector. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 12, pp. 60–69.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

### «Конструирование узлов и деталей машин»

Авторы: П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов

Изложены основные принципы конструирования узлов и деталей машин, расчеты, позволяющие определить необходимые размеры узлов и деталей машин общемашиностроительного применения. Рекомендации по конструированию и монтажу сопровождаются анализом условий работы деталей в машинах. Рассмотрены современные лазерные приборы, разработанные фирмой SKF (Швеция), для точного измерения расцентровок валов соединяемых узлов в машинах и для выверки положения шкивов клиноременных передач. Описаны конструкция и методика подбора универсальной подводимой опоры, допускающей погрешности взаимного положения корпусов вдоль оси, нормальной к поверхности контакта и углового взаимного смещения соединяемых поверхностей. Приведены методические указания к выполнению чертежей типовых деталей машин и сборочных единиц, правила оформления учебной конструкторской документации. Представлены анализ результатов расчета передач на ЭВМ и рекомендации по выбору оптимального варианта для конструктивной проработки; учтены некоторые изменения в методиках расчетов передач, подшипников качения, конструирования корпусных деталей и др.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по машиностроительным направлениям подготовки специалистов, а также преподавателей и работников конструкторских бюро предприятий.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

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