

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОГО СТРУЙНОГО НАСОСА НА ЕГО СТЕПЕНЬ СЖАТИЯ И КПД

А.Р. Исмагилов, Е.К. Спиридонов

Предложена обобщенная схема жидкостно-газового струйного насоса, которая позволяет реализовывать мероприятия по плавному сжатию газа. Приведена система уравнений и получены графики, с помощью которых можно определить вклад каждого элемента струйного насоса на величину степени сжатия газа и КПД аппарата. Даны рекомендации о целесообразности использования диффузора, выхлопного цилиндрического патрубка и двухступенчатого сжатия газа.

Ключевые слова: прыжок перемешивания, степень сжатия газа, КПД, ступень, рабочая камера, диффузор, выхлопной цилиндрический патрубок, вариант исполнения.

Жидкостно-газовые струйные насосы (ЖГСН, эжекторы) в силу простоты конструкции, многофункциональности и надежности широко распространены во многих отраслях промышленности: в металлургии, энергетике, химической, нефтегазовой, пищевой, машиностроительной и др.

В системах глубокого вакуумирования зачастую эжекторы работают на режимах, при которых КПД не высок, а потребляемая мощность достигает чрезмерно больших величин. Например, в энергетике струйные аппараты широко применяются для вакуумирования конденсаторов паровых турбин. При использовании водоструйных эжекторов массовый расход жидкости составляет $m_{\text{ж}} = 1100 \dots 1500$ т/ч [1]. В металлургии эжекторы применяются в процессах дегазации металла (метод внепечной обработки жидкого металла), где также присутствуют неоправданно высокие расходы рабочей среды. Так, рас-

ход рабочей среды (пара) на работу пароструйных эжекторов составляет 40 т/ч, а расход воды на конденсаторы, входящих в эжекционный вакуумный агрегат, – $m_{ж} = 1300...1600$ т/ч [2]. При длительной эксплуатации даже незначительное снижение массового расхода жидкости приводит к ощутимой экономии потребляемой мощности.

Таким образом, совершенствование существующих и разработка новых высокоэффективных струйных насосов составляют актуальную проблему для экономики России.

Потребная степень повышения давления в ЖГСН на многих промышленных установках достаточно велика и составляет 20...30 и более единиц. Исследования [3] показывают, что при таких степенях сжатия газа достижимые КПД ЖГСН не велики и не превышают 15...20 %. Это связано с тем, что основная составляющая всей степени сжатия газа сосредоточена в прыжке перемешивания, который представляет собой ударное явление перемешивания разноплотных сред, сопровождаемое резким возрастанием давления и снижением скорости потоков [4]. При этом ударное перемешивание сопровождается безвозвратным рассеиванием части механической энергии, трансформирующейся в тепло, величина которого увеличивается с ростом степени сжатия газа.

Чтобы снизить потери энергии в ЖГСН, уменьшив степень сжатия газа в прыжке перемешивания, целесообразно использовать мероприятия по плавному повышению давления вдоль проточной части ЖГСН, а именно:

- 1) двухступенчатое сжатие газа;
- 2) трансформацию избыточной кинетической энергии;
- 3) использование эффекта гравитации на завершающем участке проточной части струйного аппарата [5].

Реализовать эти мероприятия позволяет обобщенная схема ЖГСН, которая представлена на рис. 1. Схема состоит из четырех блоков: первой ступени I, второй ступени II, диффузора 7 и вертикального цилиндрического патрубка (ВЦП) 8. Первая и вторая

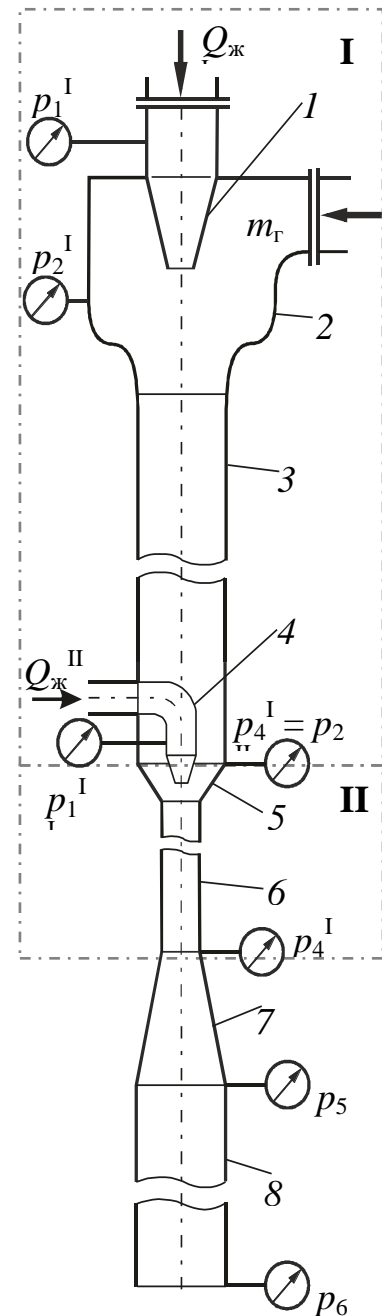


Рис. 1. Обобщенная схема ЖГСН

ступени являются составными. В первую ступень I входят: сопло питания 1, приемная камера 2 и камера смешения (рабочая камера) 3. Вторая ступень II содержит дополнительное сопло питания 4, конфузур 5 и камеру смешения (рабочая камера) 6.

Принцип работы аппарата состоит в следующем: активный поток – жидкость, истекая из сопла питания 1 первой ступени I с объемным расходом жидкости $Q_{ж}^I$, устремляется в камеру смешения 3 (рабочая камера) первой ступени I и одновременно увлекает пассивную среду – газ с объемным расходом $Q_{г2}$ из приемной камеры 2. После камеры смешения 3 первой ступени I квазиоднородная газожидкостная смесь поступает ко второй ступени II. Струей жидкости $Q_{ж}^{II}$, истекающей из сопла питания 4 второй ступени II, происходит увлечение газожидкостной смеси. Далее через конфузур 5 газожидкостная смесь попадает в рабочую камеру 6 второй ступени II. В диффузоре 7 избыточная кинетическая энергия жидкостно-газового потока трансформируется в потенциальную, вследствие чего его давление повышается с p_4^{II} до p_5 . Далее после диффузора 7 под давлением p_5 смесь поступает в ВЦП 8.

Основными безразмерными параметрами ЖГСН в таком исполнении являются степени снижения давления на сопловом устройстве первой и второй ступени $\varepsilon_{12}^I = p_1^I / p_2^I$, $\varepsilon_{12}^{II} = p_1^{II} / p_2^I$; степени сжатия $\varepsilon_{62} = p_6 / p_2^I$, $\varepsilon_{52} = p_5 / p_2^I$, $\varepsilon_{42}^I = p_4^I / p_2^I$; $\varepsilon_{42}^{II} = p_4^{II} / p_2^I$; объемные коэффициенты эжекции $\alpha_{г1} = Q_{г2}^I / Q_{ж}^I$, $\sum \alpha_{г2} = Q_{г2}^I / (Q_{ж}^I + Q_{ж}^{II})$ и КПД:

$$\eta = \frac{m_{г} \cdot R_{г} \cdot T_{ж} \cdot \ln \frac{p_6}{p_2^I}}{Q_{ж}^I \cdot (\bar{p}_1^I - p_6) + Q_{ж}^{II} \cdot (\bar{p}_1^{II} - p_6)}. \quad (1)$$

Их можно найти, решая систему уравнений (2)–(8), которая получена из уравнений неразрывности, количества движения, энергии, изотермического состояния жидкостно-газовой смеси [6, 7]:

$$\Gamma^I = 2 \cdot (\varphi^I)^2 \cdot (\varepsilon_{12}^I - 1) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{42}^I = 0,5 \cdot \left(\varepsilon_{42x}^I + \sqrt{(\varepsilon_{42x}^I)^2 - \frac{4 \cdot c^I \cdot \alpha_{2г}^I \cdot (\Omega_{03}^I)^2 \cdot \Gamma^I}{k_{П4}^I \cdot k_{г}}} \right); \quad (3)$$

$$\varepsilon_{42}^I \cdot \varepsilon_{32}^{II} \cdot \left(1 + \frac{\delta_{г2} \cdot u_{г}^{II}}{u_{ж}} \cdot \ln(\varepsilon_{42}^I \cdot \varepsilon_{32}^{II}) \right) = 1 + (1 + u_{г}^I) \cdot (\varepsilon_{12}^{II} \cdot \varepsilon_{32}^{II} - 1) \times \quad (4)$$

$$\times \left((1 + \zeta_{23}^{II}) \cdot \left(\frac{\Omega_{03}^{II}}{1 - \Omega_{03}^{II}} \cdot (u_{ж} + \delta_{г2} \cdot u_{г}^{II} \cdot \varepsilon_{42}^I \cdot \varepsilon_{32}^{II}) \right)^2 - \left(\Omega_{03}^{II} \cdot \Omega_{конф} (u_{ж} + \delta_{г2} \cdot u_{г}^{II}) \right)^2 \right);$$

$$\Gamma^{II} = 2 \cdot (\varphi^{II})^2 \cdot (\varepsilon_{12}^{II} / \varepsilon_{42}^I - 1) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{42}^{\text{II}} = 0,5 \cdot \varepsilon_{32}^{\text{II}} \cdot \left[z + \sqrt{z^2 - 4 \cdot \Gamma^{\text{II}} \cdot c^{\text{II}} \cdot (\Omega_{03}^{\text{II}})^2 \cdot \delta_{\text{r3}}^{\text{II}} \cdot u_{\text{r}}^{\text{II}} \cdot (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{r}}^{\text{II}})} \right] \quad (6)$$

$$(1 + u_{\text{ж}}^{\text{II}}) \cdot \frac{\varepsilon_{52}}{\varepsilon_{32}^{\text{II}}} + \delta_{\text{r3}}^{\text{II}} \cdot u_{\text{r}}^{\text{II}} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_{52}}{\varepsilon_{42}^{\text{II}}}\right) + \frac{\Gamma^{\text{II}}}{2} \cdot \left(1 + u_{\text{ж}} + \frac{\varepsilon_{32}^{\text{II}} \cdot \delta_{\text{r3}}^{\text{II}} \cdot u_{\text{r}}^{\text{II}}}{\varepsilon_{52}}\right)^2 \times$$

$$\times \left(\frac{\Omega_{03}^{\text{II}}}{\Omega_{54}^{\text{II}}}\right)^2 \cdot (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{r}}^{\text{II}}) = (1 + u_{\text{ж}}) \cdot \frac{\varepsilon_{42}^{\text{II}}}{\varepsilon_{32}^{\text{II}}} + \quad (7)$$

$$+ \frac{\Gamma^{\text{II}}}{2} \cdot (\Omega_{03}^{\text{II}})^2 \left(1 + u_{\text{ж}} + \frac{\varepsilon_{32}^{\text{II}} \cdot \delta_{\text{r3}}^{\text{II}} \cdot u_{\text{r}}^{\text{II}}}{\varepsilon_{52}}\right)^2 (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{r}}^{\text{II}}) \cdot (1 - \zeta_{45}).$$

$$\varepsilon_{62} = \varepsilon_{52} + \Pi_6 - \zeta_{56} \cdot \frac{\Gamma_{6c}}{2} \quad (8)$$

Здесь

$$z = 1 + \Gamma^{\text{II}} \cdot \Omega_{03}^{\text{II}} \cdot \left(1 + (u_{\text{ж}} + u_{\text{r}}^{\text{II}}) \cdot \frac{\Omega_{03}^{\text{II}}}{1 - \Omega_{03}^{\text{II}}} \cdot (u_{\text{ж}} + \delta_{\text{r3}}^{\text{II}} \cdot u_{\text{r}}^{\text{II}}) - c^{\text{II}} \cdot \Omega_{03}^{\text{II}} \cdot (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{r}}^{\text{II}})\right) \times$$

$$\times (1 + u_{\text{ж}});$$

$\Gamma^j = (\rho_{\text{ж}} \cdot (U_{\text{ж}0}^j)^2) / p_2^I$ – динамический параметр струи j -й ступени;

φ^j – коэффициент скорости сопла j -й ступени;

$\varepsilon_{42x}^I = 1 + \Gamma^I \cdot \Omega_{03}^I \cdot (1 - c^I \cdot \Omega_{03}^I)$ – степень повышения давления в рабочей камере

первой ступени I при холостом режиме работы струйного насоса ($m_{\text{r}} = 0$; $k_T = T_{\text{r}} / T_{\text{ж}}$ – поправочный коэффициент на различие температур; $k_{\text{Pi}}^j = 1 - p_{\text{н.п.}} / p_i^j$ – поправочный коэффициент на давление насыщенных паров жидкости в i -ом сечении j -й ступени; $\delta_{\text{ri}}^{\text{II}} = \rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{ri}}^{\text{II}}$ – относительный удельный объем газа; $u_{\text{r}}^j = m_{\text{r}} / m_{\text{ж}}^j$ – массовый коэффициент эжекции по газу j -й ступени; $u_{\text{ж}} = m_{\text{ж}}^I / m_{\text{ж}}^{\text{II}}$ – массовый коэффициент эжекции по жидкости; $c^j = 1 + 0,5 \cdot \zeta_{34}^j$ – параметр сопротивления для j -й ступени; ζ_{34}^j , $\zeta_{\text{конф}}$, $\zeta_{\text{диф}}$ – коэффициенты сопротивления рабочей камеры j -й ступени, конфузора и диффузора; ζ_{56} – коэффициент сопротивления вертикального цилиндрического канала; $\zeta_{\text{конф}}$ – коэффициент сопротивления конфузора; $\Omega_{\text{конф}}$ – относительное сужение конфузора; $\Omega_{03}^j = A_0^j / A_3^j$ – относительная площадь сопла j -й ступени; $\Omega_{\text{диф}} = A_5 / A_4$ – относительное расширение диффузора. $\Pi_6 = \rho_{\text{с6}} \cdot g \cdot L_{56} / p_2^I$ – относительное весовое давление столба жидкостно-газовой смеси в ВЦП; $\Gamma_{6c} = \rho_{\text{с6}} \cdot (U_{\text{с6}})^2 / p_2^I$ – динамический параметр потока в ВЦП.

Детально исследовались как одноступенчатый (включающий блоки первой ступени I, диффузора 7 и ВЦП 8), так и двухступенчатый (включающий блоки первой I и второй II ступени, диффузора 7 и ВЦП 8) варианты испол-

нения ЖГСН. Итоговая система уравнений (2)–(8) является универсальной. В случае одноступенчатого варианта исполнения ЖГСН система состоит из уравнений (2), (3), (7) и (8), где u_r^{II} приравнивается к нулю.

С помощью уравнений (2)–(8) были рассчитаны и построены безразмерные характеристики одноступенчатого (рис. 2, 3) и двухступенчатого (рис. 4–8) вариантов исполнения ЖГСН. При расчетах учитывались ограничительные условия по предельной структуре потока [8], по предельному коэффициенту скольжения фаз, по наличию пузырькового и дозвукового течений [7].

Графики на рис. 2–8 были получены на основе экстремальных характеристик [6] для первой ступени и выражений (1), (4)–(6), (8). При этом взаимосвязь между параметрами $\varepsilon_{42}^{\text{I}}$, $\varepsilon_{42}^{\text{II}}$, ε_{52} , ε_{62} , $\varepsilon_{12}^{\text{I}}$, $\varepsilon_{12}^{\text{II}}$, $\alpha_{2\Gamma}^{\text{I}}$, $\sum \alpha_{r2}$, Ω_{03}^{I} и Ω_{03}^{II} позволяет получить наилучшие, с точки зрения максимального КПД, показатели работы аппарата. Расчеты проводились при длине ВЦП равной 2,5 м, абсолютной температуре жидкости $T_{\text{ж}} = 283$ К и газа $T_{\Gamma} = 304$ К, коэффициентах скорости сопла $\varphi^{\text{I}} = \varphi^{\text{II}} = 0,95$; коэффициентах сопротивления $\zeta_{34}^{\text{I}} = 0,4$; $\zeta_{34}^{\text{II}} = 0,4$, $\zeta_{23}^{\text{II}} = 0,1$, $\zeta_{45}^{\text{II}} = 0,1$, $\zeta_{56}^{\text{II}} = 0,2$; относительном сужении конфузора $\Omega_{\text{конф}} = 0,44$; относительном расширении диффузора $\Omega_{54} = 4$

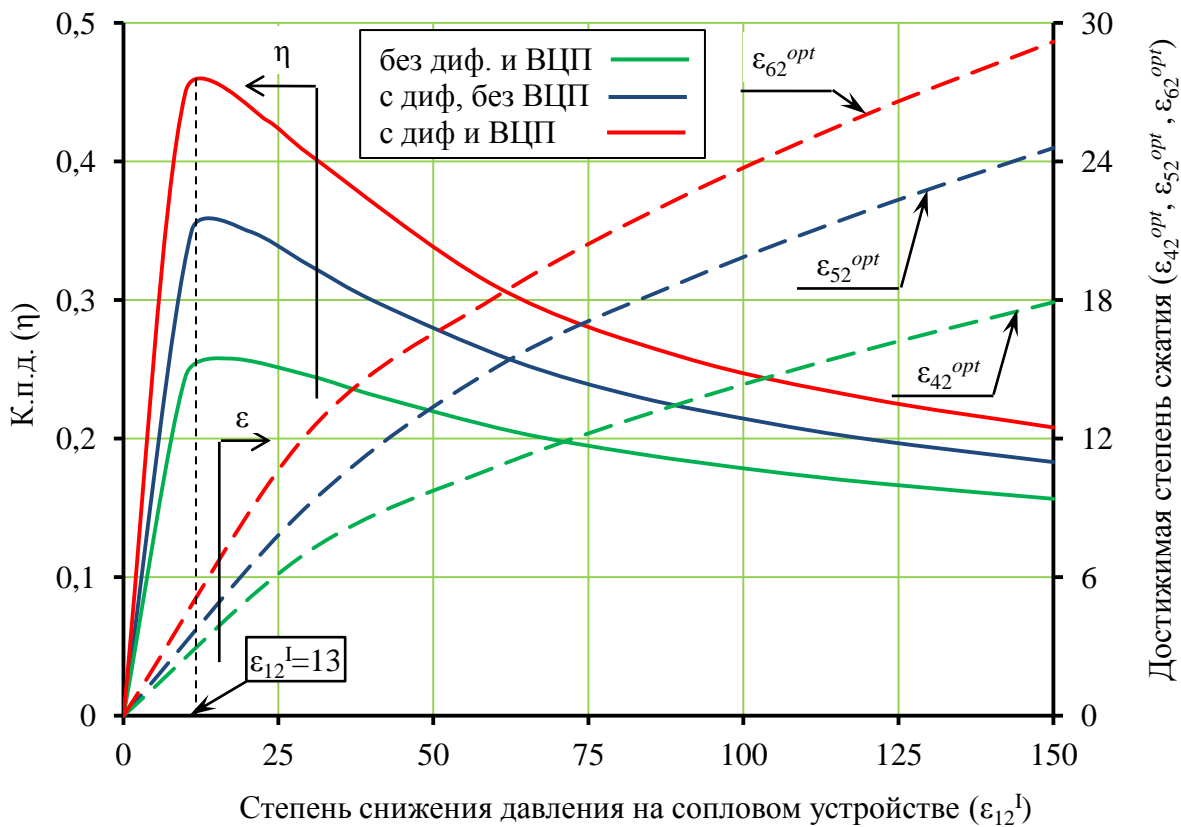


Рис. 2. Достижимые к.п.д. и степени сжатия одноступенчатого ЖГСН

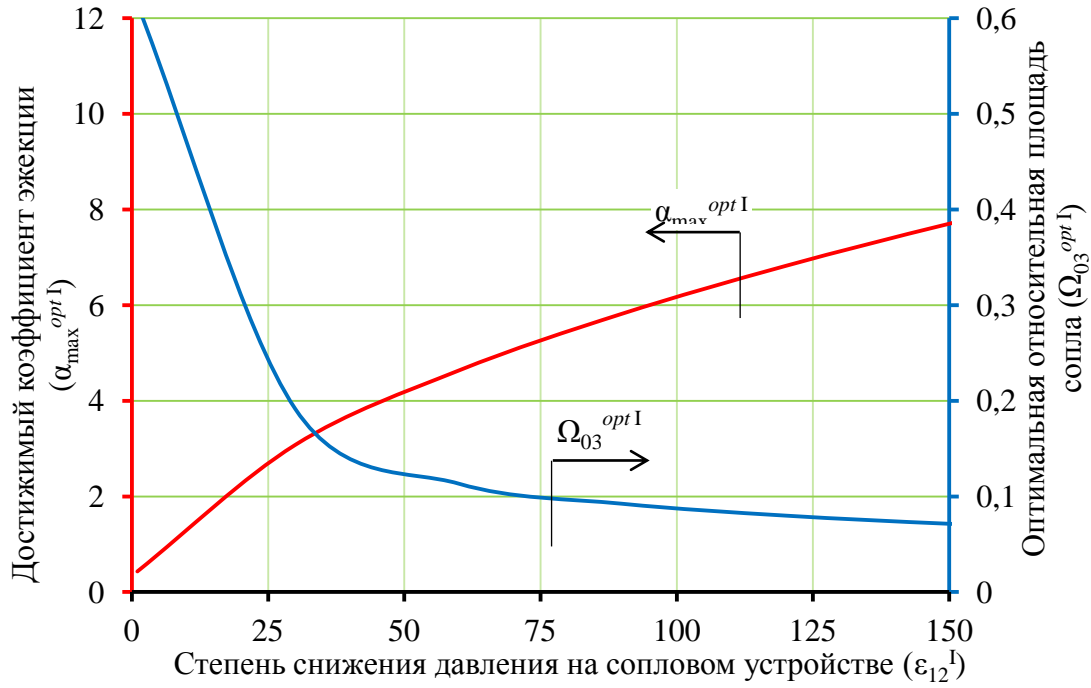


Рис. 3. Достижимый коэффициент эжекции и оптимальная относительная площадь сопла одноступенчатого ЖГСН

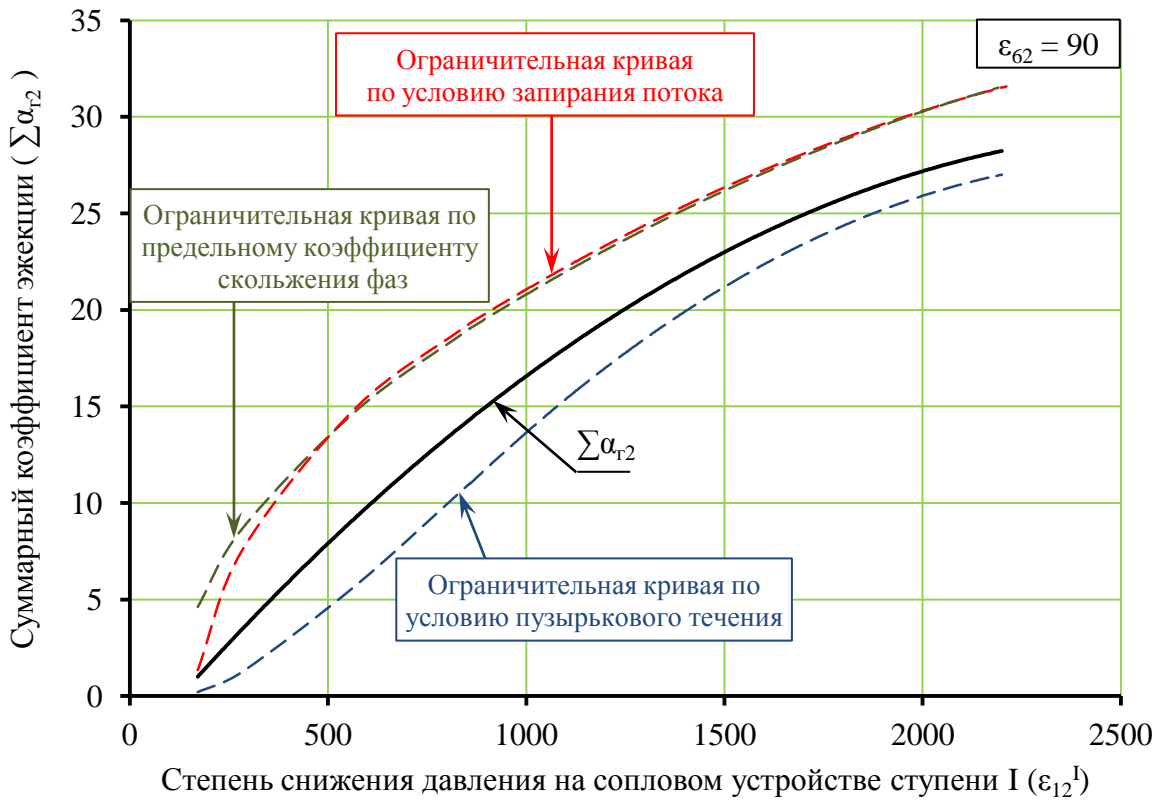


Рис. 4. Безразмерные характеристики зависимости суммарного коэффициента эжекции от степени снижения давления на сопловом устройстве первой ступени двухступенчатого ЖГСН ($\epsilon_{62} = 90$)

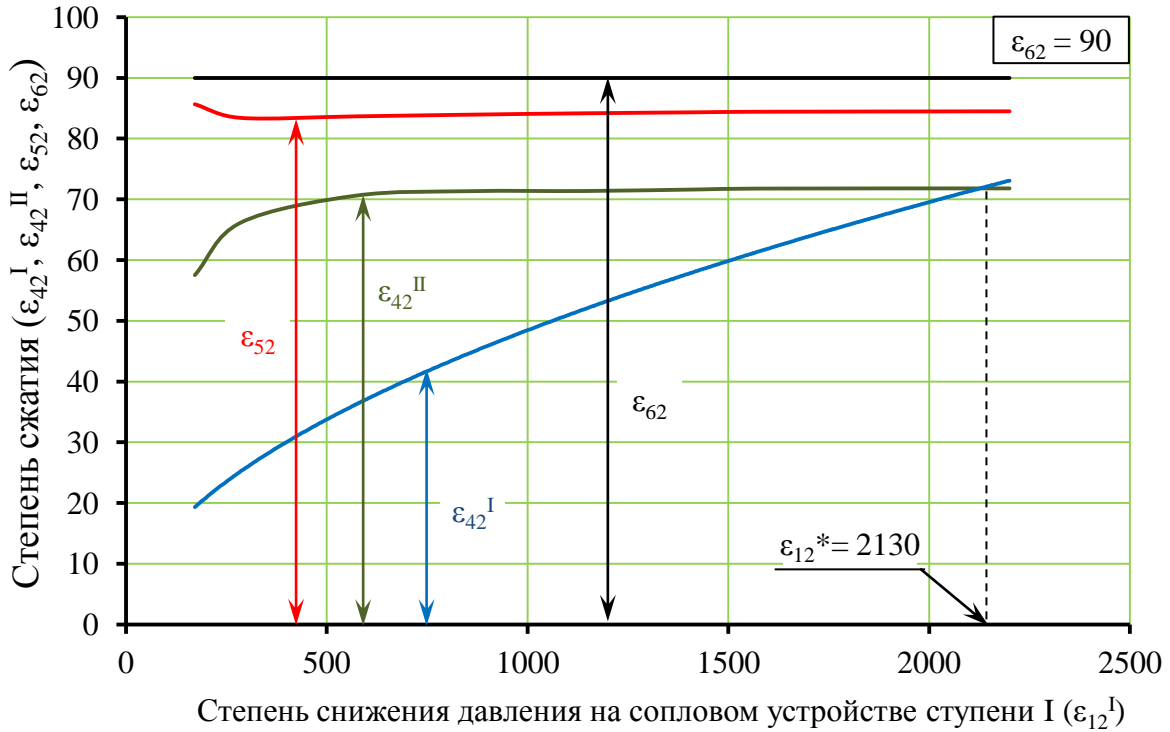


Рис. 5. Безразмерные характеристики зависимости степеней сжатия от степени снижения давления на сопловом устройстве первой ступени двухступенчатого ЖГСН ($\varepsilon_{62} = 90$)

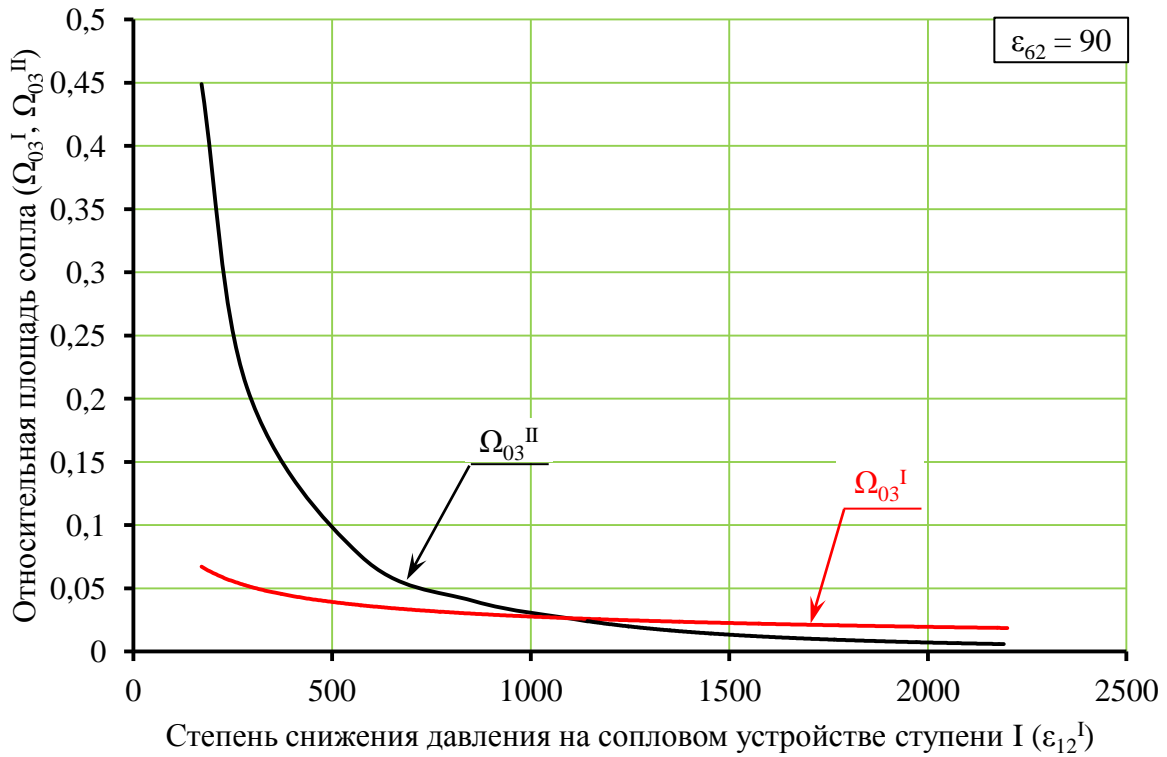


Рис. 6. Зависимость относительной площади сопла от степени снижения давления на сопловом устройстве первой ступени двухступенчатого ЖГСН ($\varepsilon_{62} = 90$)

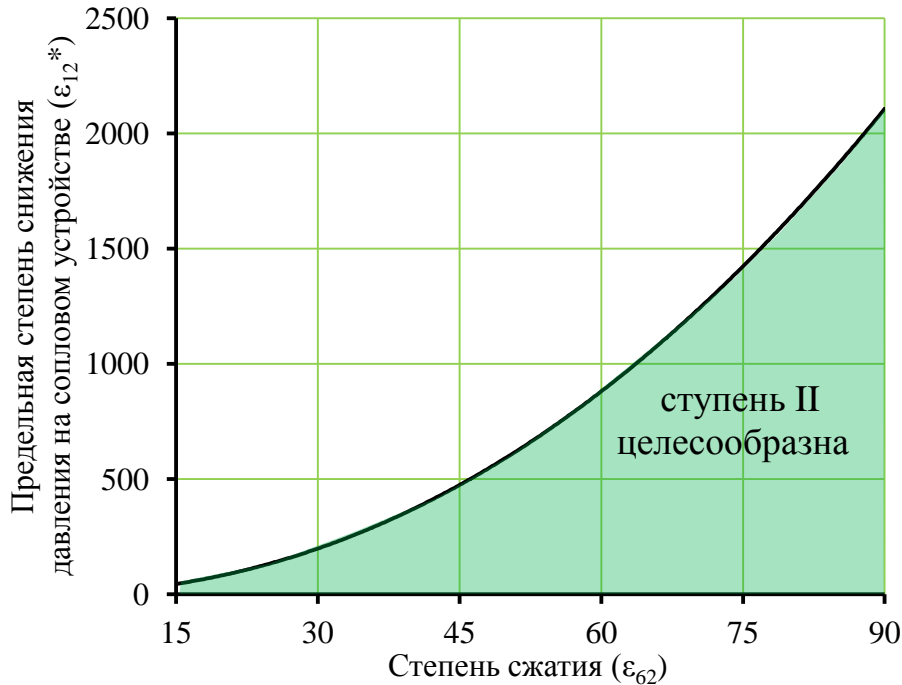


Рис. 7. Зависимость предельной степени снижения давления на сопловом устройстве от степени сжатия двухступенчатого ЖГСН ($\epsilon_{12}^I = \epsilon_{12}^{II}$)

Анализ характеристик показал, что:

1) для одноступенчатого ЖГСН, степени сжатия ϵ_{42}^I (ϵ_{52} , ϵ_{62}) растут с увеличением степени снижения давления на сопловом устройстве ϵ_{12}^I (см. рис. 2). Вклад каждого элемента в общую степень сжатия ϵ_{62} зависит от режима работы. Причем с увеличением параметров ϵ_{12}^I , α_{2r}^I данный вклад увеличивается. Существует такая взаимосвязь параметров, при которой эффективность работы аппарата наибольшая. Области ограниченные кривыми наибольших степеней сжатия одноступенчатого ЖГСН указывают на целесообразность применения диффузора и ВЦП;

2) при выполнении ЖГСН в двухступенчатом варианте важным внутренним параметром, отражающим эффективность его работы, является промежуточное давление $p_4^I = p_2^{II}$;

3) эффективность применения двухступенчатого варианта исполнения ЖГСН зависит во многом от соотношения давления на сопловом устройстве первой ступени ϵ_{12}^I . С увеличением параметра ϵ_{12}^I вклад рабочей камеры второй ступени ($\epsilon_{42}^{II} - \epsilon_{42}^I$) в общую степень сжатия ϵ_{62} постепенно уменьшается и при определенном параметре ϵ_{12}^{I*} – равен нулю (см. рис. 5);

4) область целесообразного использования двухступенчатого варианта исполнения ЖГСН ограничена и лежит ниже кривой предельной степени снижения давления на сопловом устройстве ϵ_{12}^{I*} в зависимости от степени сжатия ϵ_{62} (см. рис. 7).

Библиографический список

1. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
2. Подзерко, А.В. О возможном использовании жидкостно-газовых эжекторов в многоступенчатых системах вакуумирования / А.В. Подзерко // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 141–144.
3. Спиридонов, Е.К. Анализ эффективности работы жидкостногазового эжектора в системах вакуумирования / Е.К. Спиридонов, В.К. Темнов, А.Б. Шпитов // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Тематич. сб. научн. трудов. – 1989. – С. 135–140.
4. Witte, J.H. Mixing Shocks in Two-Phase Flow / J.H. Witte // The Journal of Fluid Mechanics. – 1969. – Vol. 36., part 4. – Pp. 639–655.
5. Спиридонов, Е.К. Об энерго- и ресурсосбережении при эксплуатации водовоздушных струйных насосов систем глубокого вакуумирования / Е.К. Спиридонов, А.Р. Исмагилов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 20. – № 33 (292). – С. 13–20.
6. Спиридонов, Е.К. Теоретические положения оптимального синтеза жидкостно-газовых струйных аппаратов и систем на их основе / Е.К. Спиридонов // Наука и технологии: тр. XXIII Росс. шк. М.: РАН, 2003. – С. 414–431.
7. Спиридонов, Е.К. Энергетические характеристики процесса эжектирования газожидкостных сред в струйном аппарате / Е.К. Спиридонов, А.В. Подзерко // Доклады секции «Гидравлика и гидропневмосистемы» 50-й юбилейной НТК 14–16 апреля 1998 г. – 1998. – С. 111–115.
8. Спиридонов, Е.К. Исследование предельных режимов работы двухфазного эжектора / Е.К. Спиридонов, СБ. Школин // Вестник ЮУрГУ. Сер.: «Машиностроение». – 2008. – Вып. 11, № 10(110). – С. 55–61.

[К содержанию](#)