

УДК 621.691.4

**УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРОВ**

UNIVERSAL CHARACTERISTICS OF LIQUID-GAS EJECTORS

Морозова Н.В., Коршак А.А.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация

ООО «НПЦ «Знание», г. Уфа, Российская Федерация

N.V. Morozova, A.A. Korshak

FSBEI of HPE “Ufa State Petroleum Technological University”,

Ufa, the Russian Federation

LLC “SPC “Knowledge”, Ufa, the Russian Federation

e-mail: korshak-spb@mail.ru

Аннотация. Жидкостно-газовые эжекторы (ЖГЭ) – перспективное средство компримирования нефтяных газов и паров нефти или нефтепродуктов. Наибольшим к.п.д. обладают ЖГЭ, разработанные научным коллективом под руководством К.Г. Донца. Их достоинством также является стандартизация размеров, позволившая получить экспериментальные зависимости для расчета коэффициента эжекции и коэффициента восстановления давления. При пользовании ими, возможно, получить характеристику ЖГЭ в виде зависимости давления смеси от расхода перекачиваемого газа. Но при этом рабочий расход газа должен обязательно совпадать с расходом газа на оптимальном режиме работы ЖГЭ. Поэтому

характеристику ЖГЭ необходимо строить под каждый рабочий расход газа.

Автором предложено представлять характеристики ЖГЭ в универсальных безразмерных координатах, справедливых при любых расходах перекачиваемого газа. В качестве безразмерных координат используются коэффициент эжекции, приведенное рабочее давление жидкости, степень сжатия, к.п.д., рабочий диапазон по коэффициенту эжекции. Совмещение универсальных характеристик на одном поле позволяет обоснованно выбирать аэродинамическую схему ЖГЭ в зависимости от характера решаемой задачи: достижение максимальной степени сжатия, минимизация давления на входе в ЖГЭ, максимальная рабочая зона по расходу перекачиваемого газа и т.д.

В насосно-эжекторных установках (НЭУ), применяемых для компримирования попутного нефтяного газа или в системах улавливания паров нефти и нефтепродуктов, формально могут быть использованы ЖГЭ с аэродинамическими схемами всех четырех типов. Однако они обладают разными технико-экономическими показателями, которые и должны учитываться при выборе типа жидкостно-газового эжектора.

Применительно к задаче компримирования газовых смесей наибольший интерес представляют такие параметры ЖГЭ как степень сжатия, давление, развиваемое насосом, энергозатраты и рабочий диапазон по величине расхода откачиваемой паровоздушной смеси.

Abstract. Liquid-gas ejectors (LGE) - a promising means of compression of oil gases and vapours of oil or oil products. The greatest efficiency have LGE developed by a research team under the leadership of

K.G.Donca. Their dignity is also standardization of sizes, which allowed to obtain experimental dependences for calculation of the coefficient of induction and recovery factor of pressure. When their use is possible to characterize LGE in the form of dependence of pressure of the mixture from the consumption of pumping gas. But the flow of gas must necessarily coincide with gas flow of the optimal mode of operation LGE. Therefore characteristic LGE need to be build under each working gas consumption.

The author proposed to represent characteristics LGE universal dimensionless coordinates fair at all costs pumping gas. As a dimensionless coordinates using coefficient of ejection contained working fluid pressure, compression ratio, efficiency, operating range coefficient of induction. The combination of universal characteristics on the same field allows you to reasonably choose the aerodynamic scheme LGE depending on the nature of the solved problems: to achieve maximum compression, the minimization of pressure at the inlet LGE, the maximum work area for the consumption of pumping gas etc.

Pump-jet installations (abnormal operational conditions), used for compressing associated petroleum gas or vapor recovery systems of oil and oil products, formally can be used LGE with aerodynamic schemes of all four types. However, they have different technical and economic parameters, which must be considered when selecting the type of liquid-gas ejector.

As for the problem of compression of gas mixtures are of greatest interest such parameters LGE as compression ratio, the pressure made by the pump, energy consumption and operating range for the flow rate of the pumped air-steam mixture.

Ключевые слова: жидкостно-газовый эжектор, коэффициент эжекции, степень сжатия, к.п.д., приведенное давление рабочей жидкости, рабочий диапазон по коэффициенту эжекции, улавливание легких фракций.

Key words: liquid-gas ejector, coefficient of ejection, compression ratio, efficiency, given the pressure of the working fluid, the working range of the coefficient of induction, the capture of light fractions.

Жидкостно-газовые эжекторы (ЖГЭ) обладают рядом несомненных достоинств, способствующих их широкому распространению в различных областях техники [1-4, 6-8, 11-13]. Существенным недостатком ЖГЭ до недавних пор являлся относительно низкий коэффициент полезного действия, составлявший немногим более 20 %.

Многолетние исследования, проводившиеся в Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа под руководством К.Г. Донца, привели к созданию стандартизированных ЖГЭ с 4-мя номерами аэродинамической схемы, имеющих к.п.д. до 40 %. Первоначально [5,9,11] было выполнено исследование характеристик ЖГЭ с геометрическим параметром $\alpha = 5,5$ и коническим диффузором при $\bar{f}_{\text{цн}} = 1$; $\bar{\ell}_{\Gamma} = 31$ и $\bar{\ell}_{\text{цн}} = 0$. Затем, [3,10] были изучены характеристики ЖГЭ с геометрическим параметром $\alpha = 2,2 - 8,4$ при $\bar{f}_{\text{цн}} = 0,6 - 0,8$; $\bar{\ell}_{\Gamma} = 4 - 8$ и $\bar{\ell}_{\text{цн}} = 12 - 16$. Окончательное обобщение полученных результатов было сделано в [4]. Основные параметры работы жидкостно-газового эжектора на оптимальном режиме было предложено рассчитывать по формулам:

- внутренний объемный расход газа, перекачиваемого ЖГЭ:

$$Q_{\Gamma \text{ ОПГ}} = \frac{z \cdot P_0 \cdot T_{\text{ж}}}{(P_{\Gamma} - P_s) \cdot T_0} \cdot Q_{\Gamma \text{ О}}; \quad (1)$$

- коэффициент эжекции (внутренний коэффициент объемного расхода):

$$u_{\text{ОПГ}} = u_{\text{max}} \cdot \left[1 - \exp\left(-B_{\text{ОПГ}} \cdot \sqrt{\bar{P} - 1}\right) \right]; \quad (2)$$

- коэффициент восстановления давления:

$$\Psi_{\text{ОПГ}} = \Psi_{\text{max}} \cdot \left[1 - \exp\left(-a_{\text{ОПГ}} \cdot \sqrt{\bar{P} - 1}\right) \right]; \quad (3)$$

- приведенное давление рабочей жидкости:

$$\bar{P} = \frac{P_{\text{ж}} - P_s}{P_{\Gamma} - P_s} \quad (4)$$

- расход рабочей жидкости:

$$Q_{\text{ж}} = Q_{\Gamma \text{ ОПГ}} / u_{\text{ОПГ}}; \quad (5)$$

- давление рабочей жидкости на входе в ЖГЭ:

$$P_{\text{ж}} = P_s + \bar{P} \cdot (P_{\Gamma} - P_s); \quad (6)$$

- степень сжатия газа (внутреннее отношение парциальных давлений):

$$\varepsilon = 1 + \Psi_{\text{ОПГ}} \cdot (\bar{P} - 1) \quad (7)$$

- давление смеси на выходе из ЖГЭ:

$$P_{\text{смОПГ}} = P_{\Gamma} + \Psi_{\text{ОПГ}} \cdot (P_{\text{ж}} - P_{\Gamma}) \quad (8)$$

где z – коэффициент сжимаемости газа;

P_0, T_0 – нормальное давление и температура;

P_s – давление насыщенных паров рабочей жидкости;

$T_{\text{ж}}$ – температура рабочей жидкости;

$Q_{\Gamma \text{ О}}$ – расход откачиваемого газа;

$a_{\text{опт}}$, $B_{\text{опт}}$ – эмпирические коэффициенты, величина которых зависит от типа аэродинамической схемы ЖГЭ; подобные коэффициенты имеются также для срывного и предельного режимов (таблица 1).

Таблица 1. Величины эмпирических коэффициентов в формулах для построения напорных характеристик ЖГЭ

Тип аэродинамической схемы ЖГЭ	Ψ_{max}	U_{max}	Оптимальный режим		Предельный режим		Срывной режим	
			$a_{\text{опт}}$	$B_{\text{опт}}$	$a_{\text{пр}}$	$B_{\text{пр}}$	$a_{\text{ср}}$	$B_{\text{ср}}$
№ 1	0,373	2,9	0,509	0,408	0,013	0,426	0,535	0,401
№ 2	0,337	5,5	0,287	0,231	0,027	0,301	0,307	0,208
№ 3	0,260	5,5	0,311	0,300	0,029	0,393	0,621	0,095
№ 4	0,218	8,4	0,241	0,248	0,021	0,296	0,255	0,223

В насосно-эжекторных установках (НЭУ), применяемых для компримирования попутного нефтяного газа или в системах улавливания паров нефти и нефтепродуктов, формально могут быть использованы ЖГЭ с аэродинамическими схемами всех четырех типов. Однако они обладают разными технико-экономическими показателями, которые и должны учитываться при выборе типа жидкостно-газового эжектора.

Для упрощения данной процедуры удобно пользоваться характеристикой ЖГЭ. В работе [14] предлагается строить характеристику как зависимость давления смеси $P_{\text{см}}$ от расхода откачиваемого газа $Q_{\text{г}}$ (рисунок 1).

Недостатком представления характеристики жидкостно-газовых эжекторов в координатах, рекомендованных в [14], является то, что она не является универсальной, т.к. ее надо строить для каждого заданного

расхода откачиваемого газа (соответственно величине $Q_{го}$ будут меняться расходы газовой фазы на предельном и срывном режимах).

Расход рабочей жидкости в этом случае находится как:

$$Q_{ж} = Q_{г\text{ опт}} \cdot U_{\text{опт}},$$

где $Q_{г\text{ опт}}$ – заданный расход откачиваемого газа (принимаемый равным расходу ЖГЭ при максимальном к.п.д., т.е. на оптимальном режиме).

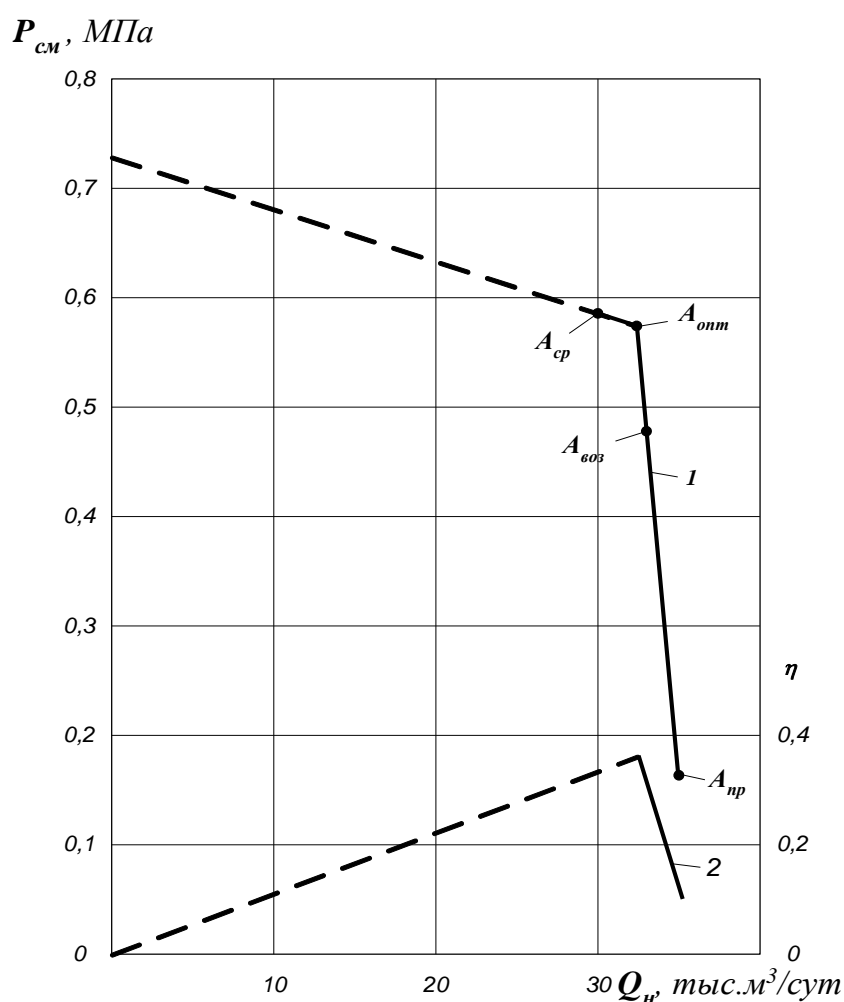


Рисунок 1. Рабочие характеристики ЖГЭ с проточной частью, выполненной по аэродинамической схеме №4 (по К.Г.Донцу):

- давление смеси на входе из ЖГЭ; 2- к.п.д. ЖГЭ

Применительно к задаче компримирования газовых смесей наибольший интерес представляют такие параметры ЖГЭ как степень сжатия, давление, развиваемое насосом, энергозатраты и рабочий диапазон по величине расхода откачиваемой паровоздушной смеси. Рассмотрим их.

Давление газожидкостной смеси на выходе из ЖГЭ описывается формулой (8). Ее можно представить в виде:

$$P_{\text{см.опт}} = P_r + \Psi_{\text{опт}} \cdot (\bar{P} - 1) \cdot (P_r - P_s) \quad (9)$$

Соответственно степень сжатия газовой смеси жидкостно-газовым эжектором равна:

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{см.опт}}}{P_r} = 1 + \Psi_{\text{опт}} \cdot (\bar{P} - 1) \cdot \left(1 - \frac{P_s}{P_r}\right). \quad (10)$$

Величина приведенного давления в формуле (10) определяется из условия, что ЖГЭ работает в оптимальном режиме, т.е. $U = U_{\text{опт}}$. Тогда из (2) получаем:

$$\bar{P} = 1 + \left[\frac{1}{B_{\text{опт}}} \cdot \ln \left(1 - \frac{U}{U_{\text{max}}}\right) \right]^2 \quad (11)$$

Из формулы (6), следует, что численное значение \bar{P} при использовании в качестве рабочей жидкости низколетучего нефтепродукта практически равно давлению, развиваемому насосом, в атмосферах.

Мощность, затрачиваемая на компримирование, при работе жидкостно-газового эжектора, с точностью до к.п.д. насоса, равна:

$$N = P_{\text{ж}} \cdot Q_{\text{ж}} \quad (12)$$

Имея в виду формулу (6), а также соотношения $Q_{\text{ж}} = Q_r / U_{\text{опт}}$ и $P_s \ll \bar{P} \cdot (P_r - P_s)$, данное выражение можно представить в следующем безразмерном виде:

$$\bar{N} = \frac{\bar{P}}{U_{\text{опт}}} = \frac{1}{U_{\text{опт}}} \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{1}{B_{\text{опт}}} \cdot \ln \left(1 - \frac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{max}}} \right) \right]^2 \right\}, \quad (13)$$

где \bar{N} - приведенная мощность, затрачиваемая на компримирование, равная:

$$\bar{N} = \frac{N}{Q_r \cdot (P_r - P_s)}$$

Рабочий диапазон ЖГЭ по безразмерному расходу откачиваемой смеси равен:

$$\Delta U = U_{\text{пр}} - U_{\text{ср}}, \quad (14)$$

где $U_{\text{пр}}$, $U_{\text{ср}}$ – коэффициенты эжекции при работе ЖГЭ соответственно на предельном и срывном режимах.

Так как величины $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{ср}}$ описываются формулами, аналогичными (2), то после простых преобразований выражение может быть представлено в виде:

$$\Delta U = U_{\text{max}} \cdot \left[\left(1 - \frac{U}{U_{\text{max}}} \right)^{-\frac{B_{\text{ср}}}{B_{\text{опт}}}} - \left(1 - \frac{U}{U_{\text{max}}} \right)^{-\frac{B_{\text{пр}}}{B_{\text{опт}}}} \right] \quad (15)$$

Коэффициент полезного действия ЖГЭ традиционно найдем как отношение полезно использованной мощности $Q_r \cdot P_r \cdot (P_{\text{см}} - P_r) / P_{\text{см}}$ к затраченной $Q_{\text{ж}} \cdot (P_{\text{ж}} - P_{\text{см}})$, что после преобразований дает:

$$\eta = U \cdot \frac{P_r \cdot (P_{\text{см}} - P_r)}{P_{\text{см}} \cdot (P_{\text{ж}} - P_{\text{см}})}. \quad (16)$$

Из формул (10), (11), (13), (14), (16) видно, что величины ε , \bar{P} , \bar{N} , ΔU и η для каждой аэродинамической схемы ЖГЭ однозначно определяются значениями U/U_{max} и не зависят от условий эксплуатации. Так же как напор, потребляемая мощность и КПД насосов зависит только от их подачи. Данная аналогия позволяет нам

предложить считать зависимость степени сжатия, приведенного давления, приведенной мощности и рабочего диапазона по безразмерному расходу ПВС от требуемого коэффициента эжекции характеристикой ЖГЭ.

Зависимость параметров ε , \bar{P} , \bar{N} и ΔU от требуемого коэффициента эжекции для ЖГЭ с разным типом аэродинамической схемы представлена на рисунках 2 - 6.

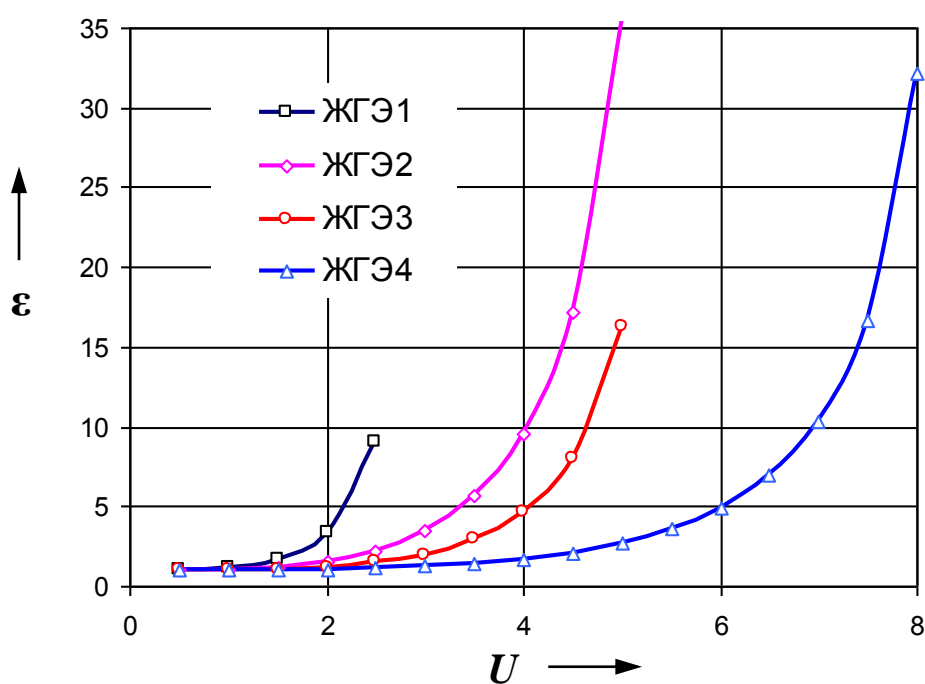


Рисунок 2. Зависимость степени сжатия ПВС от коэффициента эжекции и типа жидкостно-газового эжектора

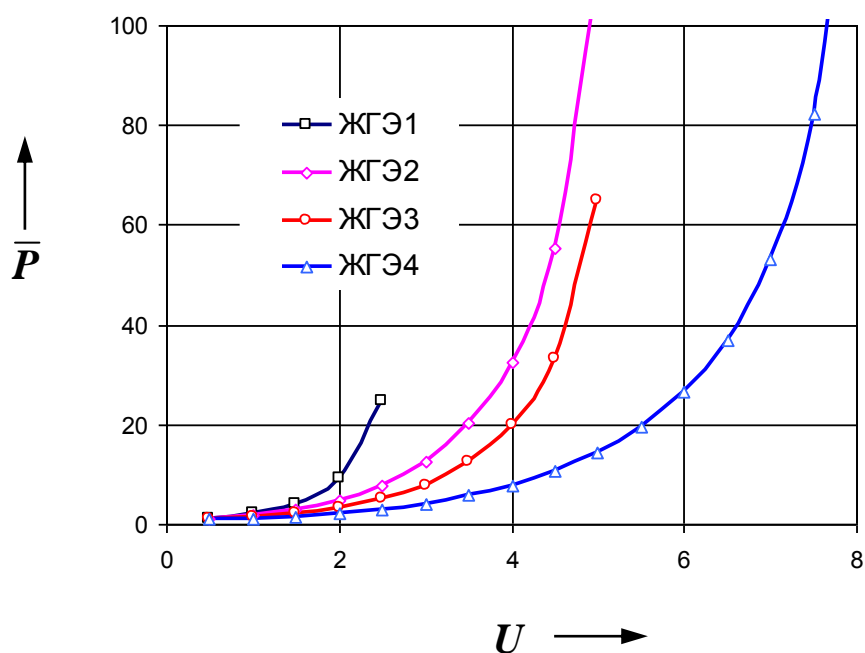


Рисунок 3. Зависимость приведенного давления от коэффициента эжекции и типа жидкостно-газового эжектора

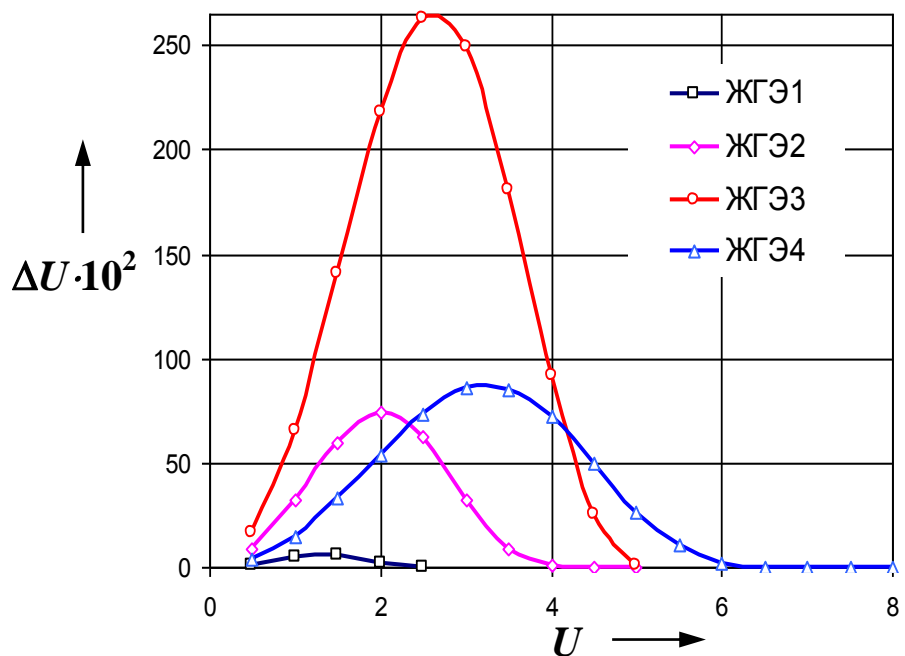


Рисунок 4. Зависимость рабочего диапазона по безразмерному расходу, откачиваемой ПВС, от коэффициента эжекции и типа жидкостно-газового эжектора

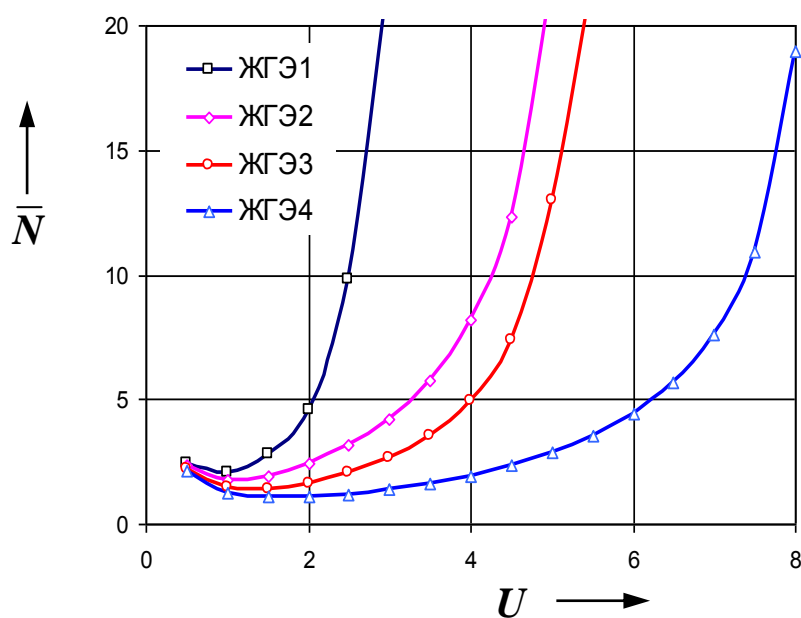


Рисунок 5. Зависимость приведенной мощности от коэффициента эжекции и типа жидкостно-газового эжектора

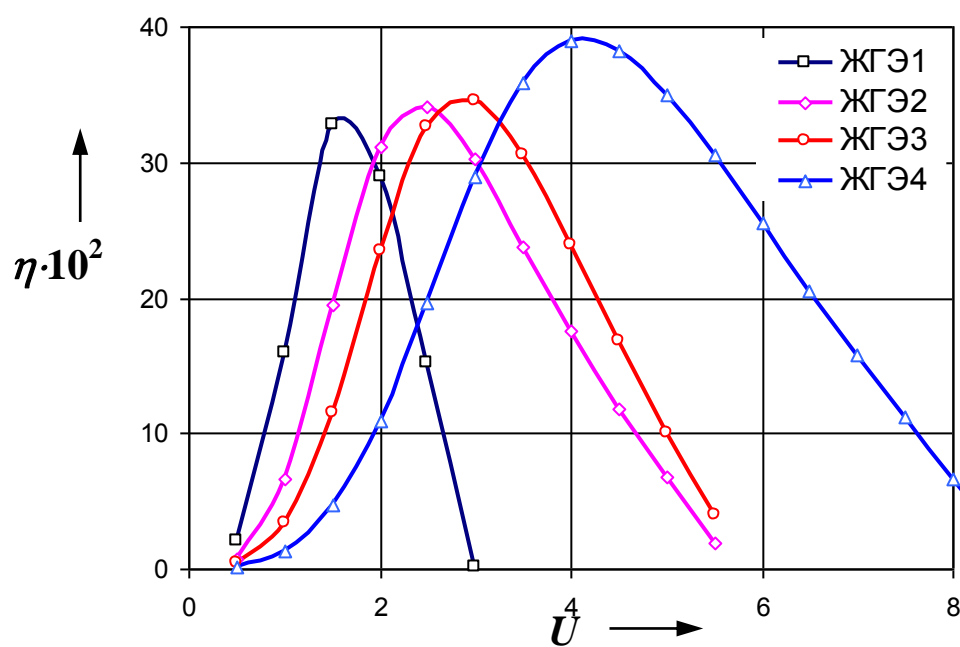


Рисунок 6. Зависимость КПД от коэффициента эжекции и типа жидкостно-газового эжектора

Видно, что чем больше требуемая величина коэффициента U , тем больше должна быть степень сжатия ПВС ε . А это требует большего давления рабочей жидкости и, соответственно, больших энергозатрат на компримирование. Положительным фактом является то, что при этом одновременно увеличивается рабочий диапазон ЖГЭ по расходу откачиваемой ПВС, то есть устойчивость его работы повышается.

Выводы

Достоинством предложенных безразмерных координат ЖГЭ является то, что они являются универсальными, т.к. не зависят ни от расхода газовой смеси, ни от характеристики используемого насоса.

Список используемых источников

1. Абдульманов Г.Ф., Губайдуллин М.М. О герметизации систем сбора, транспорта нефти и газа на нефтяных промыслах // Нефтяное хозяйство. 1974. № 1. С. 63-65.
2. Астаров Н.А. Опреснение и деаэрация воды на судах. Л.: Судостроение, 1966. 268 с.
3. Городивский А.В. Повышение эффективности насосно-эжекторных установок для утилизации нефтяных газов: дис. ... канд. техн. наук. Ивано-Франковск, 1986. 291 с.
4. Донец К.Г. Гидроприводные струйные компрессорные установки. М.: Недра, 1990. 174 с.
5. Донец К.Г., Рошак И.И., Городивский А.В. Утилизация нефтяного газа с помощью насосно-эжекторной установки в НГДУ Кинельнефть // Нефтяное хозяйство. 1979. № 7. С. 42-44.

6. Донец К.Г., Рошак И.И., Городивский А.В. Определение основных параметров насосно-эжекторной установки для компримирования газа // Нефтяное хозяйство. 1979. № 11. С. 41-43.

7. Коршак А.А. Современные средства сокращения потерь бензинов от испарения. Уфа: ООО "ДизайнПолиграфСервис", 2001. 144 с.

8. Лямаев Б.Ф. Применение водовоздушных эжекторов для откачки воздуха из центробежных насосов // Водоснабжение и санитарная техника. 1966. № 10. С. 11-13.

9. Рошак И.И., Донец К.Г., Городивский А.В. Расчет характеристик жидкостно-газового эжектора // Нефтяное хозяйство. 1980. №8. С. 44-46.

10. Рошак И.И., Городивский А.В. Характеристики жидкостно-газового эжектора // Нефтяное хозяйство. 1981. № 6. С. 54-56.

11. Рошак И.И. Разработка насосно-эжекторных агрегатов для утилизации низкопотенциальных природных и нефтяных газов: дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 166 с.

12. Семеновский Ю.В., Акульшин В.А., Пыжиков В.С. Эжекционная система аэрации в установках очистки малых количеств сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 1980. №7. С.4-6.

13. Труб И.А., Гриднева З.С. О выборе типа газоотсасывающего устройства для вакуумного деаэрата отопительной котельной // Водоснабжение и санитарная техника. 1968. №5. С. 22-25.

14. Донец К.Г. Гидроприводные струйные компрессорные установки. М.: Недра, 1990. 174 с.

References

1. Abdul'manov G.F., Gubajdullin M.M. O germetizacii sistem sbora, transporta nefti i gaza na neftjanyh promyslah // Neftjanoe hozjajstvo. 1974. № 1. S. 63-65. [in russian].
2. Astarov N.A. Opresnenie i deajeracija vody na sudah. L.: Sudostroenie, 1966. 268 s. [in russian].
3. Gorodivskij A.V. Povyshenie jeffektivnosti nasosno-jezhektornyh ustanovok dlja utilizacii neftjanyh gazov: Dis. ... kand. tehn. nauk. Ivano-Frankovsk, 1986. 291 s. [in russian].
4. Donec K.G. Hidroprivodnye strujnye kompressornye ustanovki. M.: Nedra, 1990. 174 s. [in russian].
5. Donec K.G., Roshak I.I., Gorodivskij A.V. Utilizacija neftjanogo gaza s pomoshh'ju nasosno-jezhektornoj ustanovki v NGDU Kinel'neft' // Neftjanoe hozjajstvo. 1979. № 7. S. 42-44. [in russian].
6. Donec K.G., Roshak I.I., Gorodivskij A.V. Opredelenie osnovnyh parametrov nasosno-jezhektornoj ustanovki dlja komprimirovanija gaza // Neftjanoe hozjajstvo. 1979. № 11. S. 41-43. [in russian].
7. Korshak A.A. Sovremennye sredstva sokrashhenija poter' benzinov ot isparenija. Ufa: OOO "DizajnPoligrafServis", 2001. 144s. [in russian].
8. Ljamaev B.F. Primenenie vodovozdushnyh jezhektorov dlja otkachki vozduha iz centrobezhnyh nasosov // Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika. 1966. № 10. S.11-13. [in russian].
9. Roshak I.I., Donec K.G., Gorodivskij A.V. Raschet harakteristik zhidkostno-gazovogo jezhektora // Neftjanoe hozjajstvo. 1980. №8. S. 44-46. [in russian].

10. Roshak I.I., Gorodivskij A.V. Harakteristiki zhidkostno-gazovogo jezhektora // Neftjanoe hozjajstvo. 1981. № 6. S. 54-56. [in russian].

11. Roshak I.I. Razrabotka nasosno-jezhektornyh agregatov dlja utilizacii nizkopotencial'nyh prirodnyh i neftjanyh gazov: Dis. ... kand. tehn. nauk. M.,1983. 166 s. [in russian].

12. Semenovskij Ju.V., Akul'shin V.A., Pyzhikov V.S. Jezhekcionnaja sistema ajeracii v ustanovkah ochildki malyh kolichestv stochnyh vod // Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika. 1980. №7. S.4-6. [in russian].

13. Trub I.A., Gridneva Z.S. O vybore tipa gazootsasyvajushhego ustrojstva dlja vakuumnogo deajeratora otopitel'noj kotel'noj // Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika. 1968. №5. S.22-25. [in russian].

14. Donec K.G. Gidroprivodnye strujnye kompressornye ustanovki. M.: Nedra, 1990. 174 s. [in russian].

Сведения об авторах

Information about authors

Морозова Н.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидромашины» ФГБОУ ВПО Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Уфа, Российская Федерация

N.V. Morozova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, of the Chair of “Hydraulics and Hydraulic Machines” FSBEI of NPE of Ufa State Oil Technological University, Ufa, the Russian Federation

Коршак А.А., д-р техн. наук, профессор, техн. директор ООО «НПЦ «Знание», г. Уфа, Российская Федерация

A.A. Korshak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical Director LLC “SPC “Knowledge”, Ufa, the Russian Federation

e-mail: korshak-spb@mail.ru