

УДК 621.694.3; 678.053.3

## О РАБОТЕ ЖИДКОСТНОГО ЭЖЕКТОРА ПРИ МАЛЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ЭЖЕКЦИИ

© 2014 Е.К. Спиридонов, С.Ю. Битюцких

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Поступила в редакцию 03.03.2013

Исследован рабочий процесс эжектора в качестве насоса-смесителя при малых коэффициентах эжекции. Представлена расчетная модель аппарата, на основе которой выведено аналитическое выражение безразмерной напорной характеристики. Анализом последней получены экстремальные характеристики насоса-смесителя, которые выражают предельно достижимые возможности аппарата и являются ключевыми для его расчета. Приводится пример расчета эжектора-смесителя.

Ключевые слова: *эжектор, насос-смеситель, расчетная модель, напор, коэффициент эжекции*

Эжекторы (струйные насосы) распространены во многих отраслях промышленности: энергетике, металлургии, машиностроении, нефтяной, химической. Широкое применение эжекторы получили благодаря исключительной простоте конструкции, отсутствию подвижных механических частей, простоте их изготовления, высокой надежности в работе и низкой стоимости. Действие эжектора основано на способности высокоскоростной струи жидкости или газа инициировать вокруг себя движение окружающей среды (жидкость, газ, твердый сыпучий материал либо их смеси) и увлекать ее за собой. В эжекторе одновременно протекают два взаимосвязанных процесса: передача части энергии от активного потока пассивному и их смешение. Поэтому если эжектор в гидро-пневмосистеме является насосом-смесителем, то его эффективность оказывается наивысшей, так как с пользой расходуется не только энергия пассивного потока, но и остаточная энергия активного потока. В противном случае, если эжектор используется только в качестве насоса, его эффективность невысокая [3].

Во многих производствах требуется получение двух- или многокомпонентных смесей, в которых доля одной компоненты существенно меньше доли другой. Например, создание водомазутной смеси в качестве топлива для теплоэнергетики с целью снижения вредных выбросов, добавление легирующих элементов в масло для получения качественных смазочно-охлаждающих жидкостей, парафиновых паст в бетонную смесь с целью получения водостойкого

бетона в строительной отрасли, растительного масла в воду с целью получения гидрофильной смеси, которая используется как компонент рецептуры теста для хлеба в хлебопекарной промышленности. В фармакологии и медицине широко применяются смеси на основе воды и малого количества органических масел.

Во всех выше перечисленных технологических процессах предъявляются жесткие требования к получению смеси, а именно строго дозированное количество добавок, вносимых в несущую среду, и их тщательное гомогенизирование. Для получения таких смесей можно использовать эжектор, в котором активный поток (высоконапорный) является несущей средой (например, жидкость), а пассивный поток (эжектируемая среда) – необходимые для получения смеси добавки. Применение эжектора в качестве насоса-смесителя позволит получить высококачественные смеси из жидкостей, газов, многофазных сред (газ-жидкость) и твердых сыпучих материалов. При этом если совместить работу эжектора-смесителя с кавитацией в его проточной части, то можно получить наиболее качественные смеси, которые обладают высокой однородностью и стойкостью к расслоению [4].

Известные методы расчета эжекторов ориентированы, главным образом, на разработку эжектора с высокой производительностью (подачей) по эжектируемой среде [1-3]. Для производств, где требуется получение смеси с малыми расходами эжектируемой среды по сравнению с расходом активной среды, предложенные методы расчета не применимы.

**Цель работы:** проведение дополнительных исследований и разработка метода расчета эжектора-смесителя с малыми расходами эжектируемой среды.

*Спиридонов Евгений Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры гидравлики и гидропневмосистем. E-mail: ggps@susu.ac.ru*

*Битюцких Сергей Юрьевич, аспирант. E-mail: BityutskikhS@gmail.com*

Геометрия проточной части эжектора-смесителя показана на рис. 1а. Там же указаны характерные живые сечения ( $i=0,1...5$ ) – границы отдельных его элементов. Активный поток (жидкая среда) поступает в эжектор-смеситель через сопло, увлекая за собой пассивный поток (добавка в несущую среду) из приемной камеры, центральную часть которой занимает сопло. При этом в приемной камере давление понижается, что обеспечивает приток в нее пассивной среды. После энергообмена и

смешения в цилиндрической смесительной камере оба потока, пройдя диффузор и повысив в нем уровень потенциальной энергии за счет кинетической, транспортируются потребителю. На рис. 1б построены напорные линии активного и пассивного потоков, выражающие изменение полного напора от одного сечения к другому ( $X$  – продольная координата;  $\Delta h_c$ ,  $\Delta h_{вх}$ ,  $\Delta h_d$  – потери напора внутри сопла, при входе пассивного потока в камеру смешения и в диффузоре, соответственно).

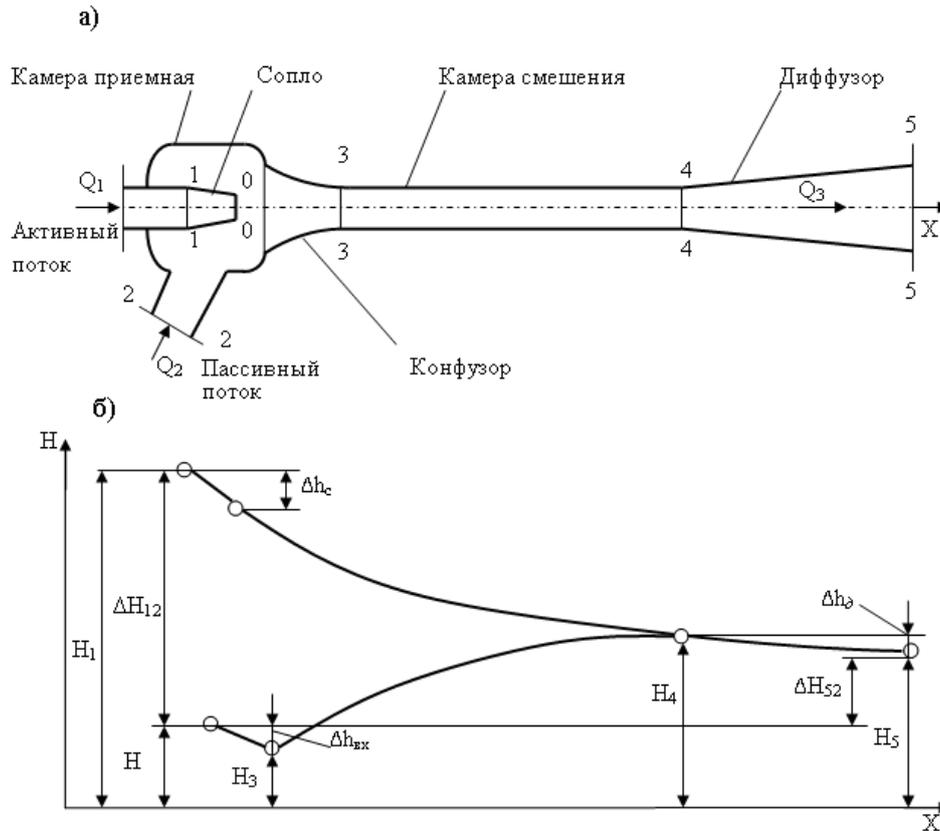


Рис. 1. Расчетная схема эжектора (а) и напорные линии активного и пассивного потоков в нем (б)

Расчетная модель рабочего процесса жидкостного эжектора-смесителя включает уравнения баланса расходов:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2; \quad (1)$$

Согласно Д. Бернулли для активного потока в сопловом устройстве (сечения 1-1 и 0-0), пассивного потока в приемной камере и входном раструбе камеры смешения (сечения 2-2 и 3-3) и потока смеси в диффузоре (сечения 4-4 и 5-5) имеем:

$$H_1 = \frac{p_3}{\rho_a \cdot g} + (\beta_a + \xi_c) \cdot \frac{v_{31}^2}{2 \cdot g}; \quad (2)$$

$$H_2 = \frac{p_3}{\rho_{п} \cdot g} + (\beta_{п} + \xi_{вх}) \cdot \frac{v_{32}^2}{2 \cdot g}; \quad (3)$$

$$H_5 = \frac{p_4}{\rho_{см} \cdot g} + (\beta_{см} - \xi_{диф}) \cdot \frac{v_4^2}{2 \cdot g}; \quad (4)$$

Замыкает расчетную модель уравнение количества движения, составленное для контрольного отсека жидкости в камере смешения (сечения 3-3 и 4-4):

$$\begin{aligned} p_3 \cdot A_3 - p_4 \cdot A_3 - \xi_{тд} \cdot A_3 \cdot \rho_{см} \frac{v_4^2}{2} = \\ = \beta_{см}' \cdot \rho_{см} \cdot Q_3 \cdot v_4 - \beta_a' \cdot \rho_a \cdot Q_1 \cdot v_{31} - \\ - \beta_{п}' \cdot \rho_{п} \cdot Q_2 \cdot v_{32} - \beta_{п} \cdot \rho_{п} \cdot Q_2 \cdot v_{32} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $Q_1, Q_2, Q_3$  – расходы, соответственно активного, пассивного и потока смеси;  $H_i, p_i$  – напор и статическое давление в  $i$  сечении эжектора;  $v_{i1}, v_{i2}, v_i$  – скорости активного, пассивного потоков и их смеси в  $i$  сечении эжектора;  $\rho_a, \rho_{п}, \rho_{см}$  – плотности активной, пассивной среды и смеси;  $\xi_c, \xi_{тр}, \xi_{диф}, \xi_{вх}$  – коэффициенты сопротивлений сопла, камеры смешения, диффузора и входа в камеру смешения;  $A_3$  – площадь нормального сечения камеры смешения;  $\beta_a, \beta_{п}, \beta_{см}, \beta'_a, \beta'_{п}, \beta'_{см}$  – коэффициенты кинетической энергии и количества движения, активного и пассивного потоков и их смеси в соответствующих живых сечениях.

Система уравнений (1)-(5) позволяет по известным параметрам активного и пассивного потоков на входе в эжектор-смеситель найти параметры потока смеси на его выходе и рассчитать характеристики аппарата. В отличие от механического насоса, работа которого характеризуется, как правило, тремя параметрами: напоры потока на входе и выходе насоса и его подача, работа эжектора характеризуется шестью параметрами: напорами и расходами активного, пассивного потока и их смеси. Поэтому принято эжекторы исследовать и рассчитывать в

безразмерных координатах: относительный напор и относительный расход (коэффициент эжекции).

$$h = \frac{H_3 - H_2}{H_1 - H_2}; \quad \alpha = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (6)$$

Относительный напор изменяется  $0 \leq h \leq 1$ , относительный расход  $0 \leq \alpha \leq (1 - \Omega) / \Omega$ , где  $\Omega = A_0 / A_3$  – относительная площадь сопла, изменяется в пределах  $0 \leq \Omega \leq 1$ . Взаимосвязь этих параметров  $h = f(\alpha, \Omega)$  является важнейшей безразмерной характеристикой эжектора. Ее аналитическое выражение выводится на основании выше приведенных уравнений (1)-(5) и выражений относительного напора и коэффициента эжекции (6):

$$h = \left[ 2 = \Omega \cdot \left( \beta'_a + \frac{\Omega}{1 - \Omega} \cdot \beta'_{п} \cdot \delta \cdot \alpha^2 \right) - (\beta_{см} + \xi_{тр} + \xi_{диф}) \cdot (1 + \alpha \cdot \delta) \cdot \beta'_{см} \times \right. \\ \left. \times \Omega^2 \cdot (1 + \alpha) - (\beta_{п} + \xi_{вх}) \cdot \delta \cdot \left( \frac{\alpha \cdot \Omega}{1 - \Omega} \right)^2 \right] \times \\ \times \frac{1}{(\beta_a + \xi_c)}, \quad (7)$$

где  $\delta = \rho_{п} / \rho_a$  – относительная плотность пассивного потока.

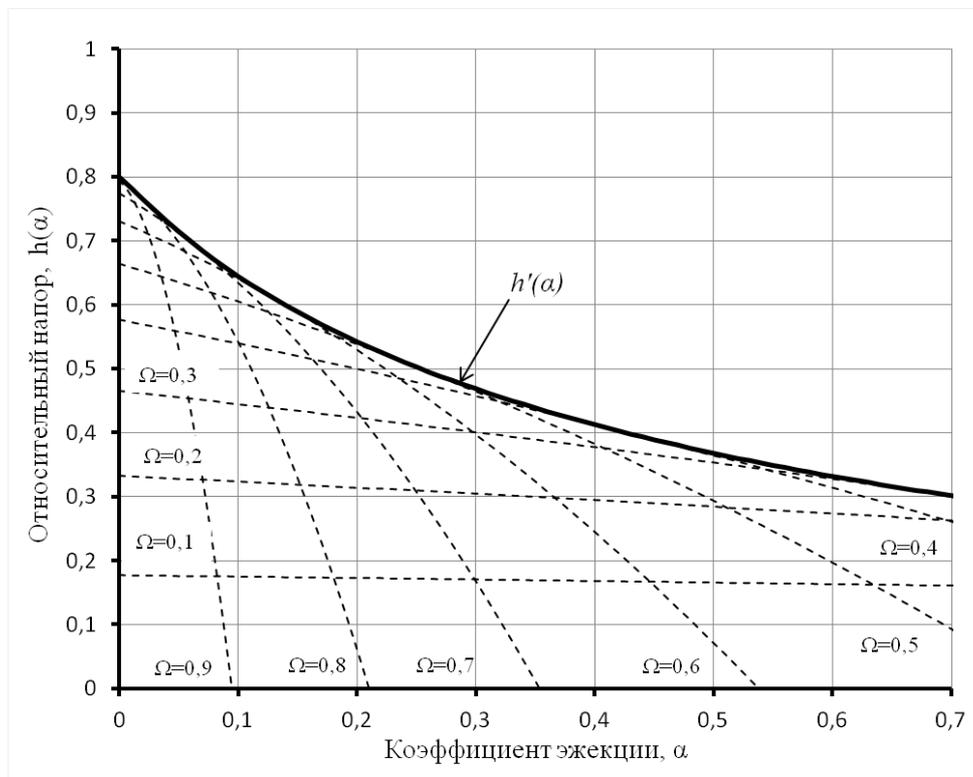


Рис. 2. Безразмерные напорные характеристики эжектора

Из уравнения (7) видно, что относительный напор зависит от коэффициента эжекции, относительной площади сопла, относительной плотности пассивного потока и гидравлических коэффициентов. На рис. 2 представлена

графическая иллюстрация семейства безразмерных напорных характеристик  $h(\alpha)$  (пунктирные линии). Параметром семейства характеристик является относительная площадь сопла  $\Omega$ . Характеристики рассчитаны при одинаковой

плотности активной и пассивной сред ( $\delta = 1$ ) и следующих значений коэффициентов:  $\beta_{см} = \beta_a = \beta_{п} = 1$ ,  $\beta_{см}' = \beta_a' = \beta_{п}' = 1$ ,  $\xi_c = 0,06$ ,  $\xi_{вх} = 0,1$ ,  $\xi_{диф} = 0,09$ ,  $\xi_{тр} = 0,09$  [2, 3]. Видно, что все характеристики  $h(\alpha)$  располагаются в нижнем левом углу координатной плоскости  $\alpha-h$ . К их множеству можно провести огибающую, которая делит все координатное поле на две части: область возможных режимов работы эжекторов и физически невозможных. Сама огибающая устанавливает предельно достижимые значения параметров эжектора.

Для определения предельно достижимых значений параметров рабочего процесса эжектора-смесителя запишем условие нахождения экстремума в следующем виде (7):

$$\left. \frac{dh}{d\Omega} \right|_{\alpha=const} = 0 \quad (8)$$

Совместным решением уравнений (7) и (8) для каждого значения  $\alpha$  находим оптимальное соотношение относительной площади сопла  $\Omega$  и предельно достижимый относительный напор  $h$ . На рис. 3 приведены экстремальные характеристики эжектора, выражающие зависимость предельно достижимого относительного напора и оптимальной относительной площади сопла от коэффициента эжекции. Характеристики рассчитаны при следующих значениях относительной плотности  $\delta = 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2$ . Сопоставление кривых показывает, что с увеличением относительной плотности пассивного потока достижимые напоры и оптимальная площадь сопла снижаются. Экстремальные характеристики являются ключевыми для расчета эжектора-смесителя.

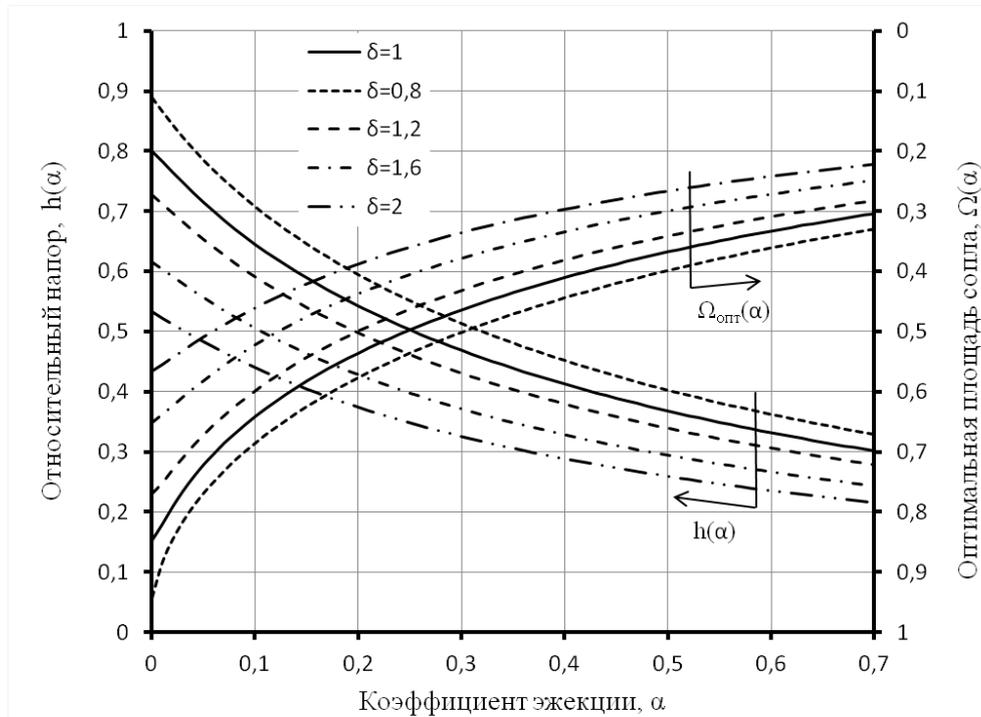


Рис. 3. Экстремальные характеристики эжектора при различных относительных плотностях смешиваемых сред

**Пример расчета.** Необходимо получить качественную водомасленную смесь с давлением  $p_5=250$  кПа и соотношением компонентов: несущая среда – вода ( $\rho_в=1000$  кг/м<sup>3</sup>) с расходом  $Q_a=2$  дм<sup>3</sup>/с, добавка – масло ( $\rho_м=800$  кг/м<sup>3</sup>) с  $Q_{п}=0,5$  дм<sup>3</sup>/с. Предложено в качестве насоса-смесителя использовать эжектор, к которому подвод масла осуществляется при давлении  $p_2=100$  кПа. Требуется рассчитать эжектор-смеситель, обеспечивающий минимальное энергопотребление.

При заданном расходе активного потока воды минимальное энергопотребление

соответствует минимальному давлению питания  $p_1$ . В соответствии с безразмерными параметрами, минимальному давлению питания соответствует максимальное значение относительного напора  $h$ . Поэтому расчет эжектора-смесителя основываем на экстремальных характеристиках.

Вычислим коэффициент эжекции и относительную плотность смешиваемых сред;  $\alpha=Q_{п}/Q_a=0,25$ ,  $\delta=\rho_м/\rho_в=0,8$ . Обращаясь к экстремальной характеристике (см. рис. 3) определим относительное повышение напора на смесителе  $h=0,55$  и относительную площадь сопла  $\Omega=0,54$ .

Принимая в первом приближении  $H_5 - H_2 = p_5 - p_2$  и  $H_1 - H_2 = p_1 - p_2$ , определим давление питания:

$$p_1 = \frac{p_5 - p_2}{h} + p_2 = \frac{(250 - 100) \cdot 10^3}{0,55} + 100 \cdot 10^3 = 372 \text{ кПа}$$

Из уравнений (2) и (3) определим скорость струи при  $\xi_c = 0,06$ ,  $\xi_{вх} = 0,1$ :

$$v_o = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{12}}{\rho \cdot \left(1 + \xi_c - \delta \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Omega}{1 - \Omega}\right)^2 \cdot (1 + \xi_{вх})\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (372 - 100) \cdot 10^3}{10^3 \cdot \left(1 + 0,06 - 0,8 \cdot \left(\frac{0,25 \cdot 0,5}{1 - 0,5}\right)^2 \cdot (1 + 0,1)\right)}} = 23,3 \text{ м/с.}$$

Площадь выходного сечения и диаметр сопла:

$$A_o = \frac{Q_a}{v_o} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{23,3} = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$d_o = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_o}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{8,6 \cdot 10^{-5}}{3,14}} = 0,010 \text{ м.}$$

Вычислим диаметр смесительной камеры:

$$d_3 = \frac{d_o}{\sqrt{\Omega}} = \frac{0,016}{\sqrt{0,5}} = 0,022 \text{ м}$$

Остальные размеры эжектора вычисляются на основе рекомендаций, изложенных в [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты - 3-е изд., перераб. / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. - М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
2. Подвидз, Л.Г. Расчёт струйных насосов и установок / Л.Г. Подвидз, Ю.Л. Кирилловский // Труды ВНИИгидромаша. - ВНИИгидромаш, 1968. Вып. 38. С. 44-96.
3. Темнов, В.К. Расчёт и проектирование жидкостных эжекторов: учебное пособие / В.К. Темнов, Е.К. Спиридонов. - Челябинск: ЧПИ, 1984. 44 с.
4. Спиридонов, Е.К. Рабочий процесс и характеристики гидродинамических кавитационных эмульгаторов / Е.К. Спиридонов, Л.С. Прохасько // Вестник ПГТУ. Сер. аэрокосмическая техника. - Пермь, 2000. №5. С. 93-98.

## ABOUT FUNCTIONING OF THE LIQUID EJECTOR AT SMALL COEFFICIENTS OF EJECTION

© 2014 Е.К. Spiridonov, S.Yu. Bityutskikh

South Ural State University, Chelyabinsk

The working process of an ejector of the mixing pump at small coefficients of ejection is investigated. It is presented the calculated model of the device on the basis of which analytical expression of the dimensionless pressure head characteristic is removed. The analysis of the last received extreme characteristics of the mixing pump which express extremely accessible opportunities of the device, which are main for its calculation. The example of calculation of an mixing ejector is given.

Key words: *ejector, mixing pump, calculated model, pressure, ejection coefficient*

*Evgeniy Spiridonov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Hydraulics and Hydropneumoseystems Department. E-mail: ggps@susu.ac.ru*  
*Sergey Bityutskikh, Post-graduate Student. E-mail: BityutskikhS@gmail.com*