

УДК 622.232.522.24

**А.Ф. Яценко**, канд. техн. наук, доц.,  
**Т.А. Устименко**, канд. техн. наук, доц.,  
Донецкий национальный технический университет

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОВОЗДУШНОГО ЭЖЕКТОРА**

*Полученные зависимости позволяют определить оптимальные конструктивные параметры водовоздушного эжектора и тем самым повысить его коэффициент эжекции и КПД.*

**Ключевые слова:** эжектор, струя, насадок, камера смещения, диффузор, угол расширения, коэффициент эжекции.

### ***Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.***

Струйные аппараты нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, благодаря простоте конструкции, несложности ремонта и обслуживания, отсутствию подвижных деталей.

В зависимости от рода рабочей и эжектируемой жидкости струйные аппараты делятся на струйные насосы (рабочая и эжектируемая жидкость – вода), водовоздушные эжекторы (ВВЭ: рабочая жидкость – вода, эжектируемая – воздух) и т.д. Эти два типа струйных аппаратов нашли наиболее широкое применение в промышленности. Если первый тип достаточно исследован и разработана инженерная методика его расчета, то расчет двухфазных систем основан на экспериментальных данных и справедлив в весьма узких пределах режимных и конструктивных параметров.

***Анализ исследований и публикаций.*** Более чем за столетний период создания струйных аппаратов разработано много методик их расчета. Наиболее поздние и совершенные приведены в (1-4). Используя их для одних и тех же параметров, получаем различные результаты, отличающиеся друг от друга в несколько раз. Общей методики их расчета не существует. Из известных можно выделить следующие:

- основанные на уравнениях: количества движения, баланса энергии;
- основанные на теоретических зависимостях, полученных в результате совместного решения уравнений неразрывности, количества движения;
- основанные на эмпирических зависимостях.

Практически все методики полностью или частично базируються на полученных эмпирических зависимостях.

Многочисленные исследования, проведенные на кафедре «Энергомеханические системы» Донецкого национального технического университета, показали, что определяющим элементом в работе водовоздушных эжекторов является струя. От её геометрических параметров (в частности, угла расширения внешней границы струи) зависят оптимальные конструктивные параметры эжектора.

**Постановка задачи.** Основными конструктивными параметрами водовоздушных эжекторов являются: диаметр насадка, диаметр камеры смешения, расстояние от насадка до камеры смешения, длина камеры смешения, длина диффузора. Все они в большей или меньшей степени зависят от угла расширения струи. Основываясь на зависимостях, позволяющих вычислить этот угол, можно определить эти параметры.

**Изложение материала и результаты.** Характерной особенностью водовоздушных эжекторов является большая разница плотности рабочей воды и эжектируемого воздуха  $\rho_v / \rho_{эж}$ . Это отношение может достигать  $10^4$  и более. Так, если плотность воды  $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ , то плотность воздуха при абсолютном давлении в камере смешения  $0,1 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,01 \text{ МПа}$ ) составляет примерно  $0,12 \text{ кг/м}^3$ . Поэтому, при исследованиях и расчетах ВВЭ пользуются объемным коэффициентом, который находится в пределах  $0,1-5,0$ .

При проведении экспериментальных исследований водовоздушные эжекторы выполняются из прозрачного материала. Наблюдение и фотографирование приемной камеры и камеры смешения позволяют определить процессы, происходящие в них (рис.1)

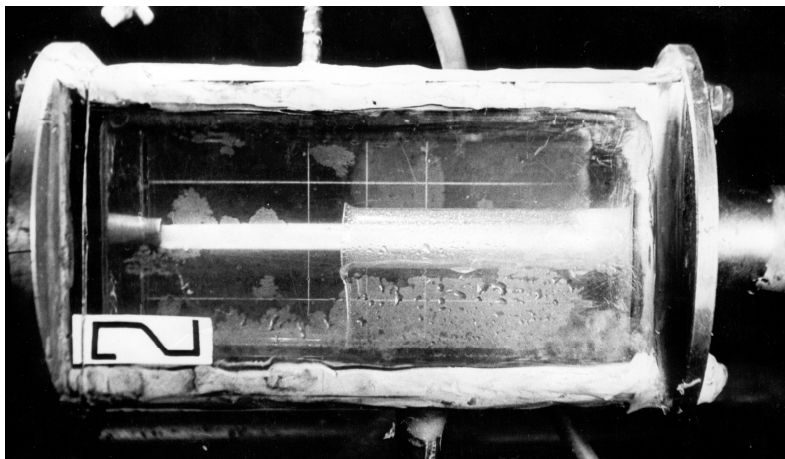


Рис.1. Камера смешения и диффузор прозрачные

Чем больше отношение сечений камеры смешения и насадка, тем более развиты обратные токи водовоздушной эмульсии. Такой же процесс происходит при увеличении противодействия. При определенном противодействии  $(P_c)_{\max}$  обратные токи увеличиваются, эжекция воздуха прекращается, и вся камера смешения заполняется прозрачной водой. То же самое происходит при снижении давления перед насадком при неизменном противодействии (рис.2).

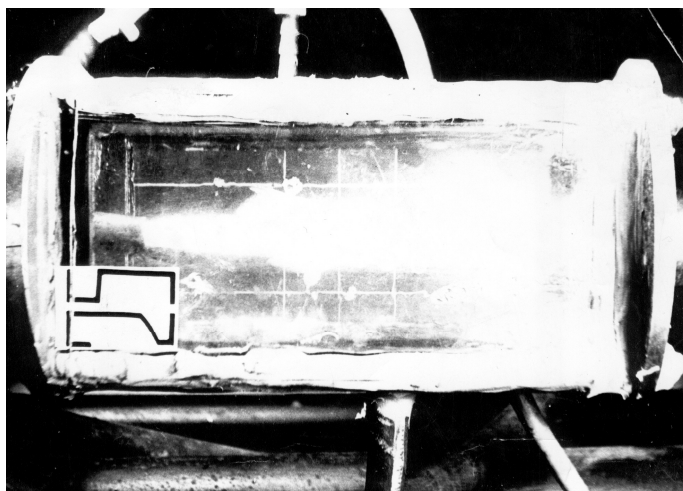


Рис. 2. Обратные токи водовоздушной эмульсии

Предложенные до настоящего времени различными авторами методы расчета водовоздушного эжектора, базируются на эмпирических формулах. Такой подход позволяет получить результаты, более или менее точные, но в весьма узком диапазоне гидравлических параметров (давления рабочей, эжектируемой, сжатой сред). Как показали исследования, стабильным является объемный коэффициент эжекции:

$$U_0 = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{воз}}} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{в}}$  – объемный расход воздуха;  $Q_{\text{вод}}$  – объемный расход воды.

На основании многочисленных исследований многие авторы предлагают формулы, справедливые в весьма узком диапазоне параметров, так, [4] предлагает определять  $U_0$ :

$$U_0 = 0,85 \sqrt{\frac{\Delta P_p}{\Delta P_c}} - 1 \quad (2)$$

и отношение сечений камеры смешения и насадка  $\frac{f_c}{f_n}$  по уравнению:

$$\frac{f_c}{f_H} = \frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} \quad (3)$$

Эти зависимости были получены для гидравлических параметров водовоздушных эжекторов, применяемых в теплоэнергетике. Давление рабочей жидкости находится на уровне 1 МПа (10 кгс/см<sup>2</sup>). Для горной промышленности (особенно для гидрошахт) это давление составляет 10 МПа, а иногда и выше. Тогда объемный коэффициент эжекции превышал бы значение 8, а отношение  $\frac{f_c}{f_H} > 100$ . Отношение

диаметров составило бы  $\frac{d_c}{d_H} > 10$ . А это значит, что, например, при

диаметре насадка 30 мм диаметр камеры смешения должен быть равен 300 мм. В этом случае струя воды проходила бы камеру смешения, не касаясь ее стенок и, естественно, коэффициент эжекции был бы равен 0.

Все теоретические и экспериментальные исследования водовоздушных эжекторов были проведены без учета особенностей их работы, как двухфазных струйных аппаратов. В них струя является свободной и незатопленной. Она – рабочий орган такой же, как и поршень в поршневом насосе и определяет процессы, происходящие в водовоздушном эжекторе и эффективность его работы. Как показали исследования [5], особенностью струи водовоздушного эжектора является ее истечение в воздушную среду с давлением значительно меньше атмосферного ( $P_H < 0,5$  кгс/см<sup>2</sup>). Это существенно влияет на параметры струи (угол расширения, распределение скоростей, длина начального участка и т.д.).

Определяющую роль на структуру струи на выходе из насадка играет растворенный в ней воздух. Попадая в приемную камеру, где давление значительно ниже атмосферного, растворимость газа в жидкости уменьшается, сжатый газ расширяется, что ведет к расширению струи, увеличению ее диаметра. На рис. 3 показаны струи, истекающие в приемную камеру с различными давлениями.

Из рис. 3 видно, что с уменьшением давления угол расширения значительно увеличивается. Его величина  $a$  определяется по зависимости:

$$\operatorname{tga} = cd^{0,375} \mu^{-0,5} g^{-0,125} u^{0,75} \rho_B^{0,5} \quad (4)$$

или используя критерии:

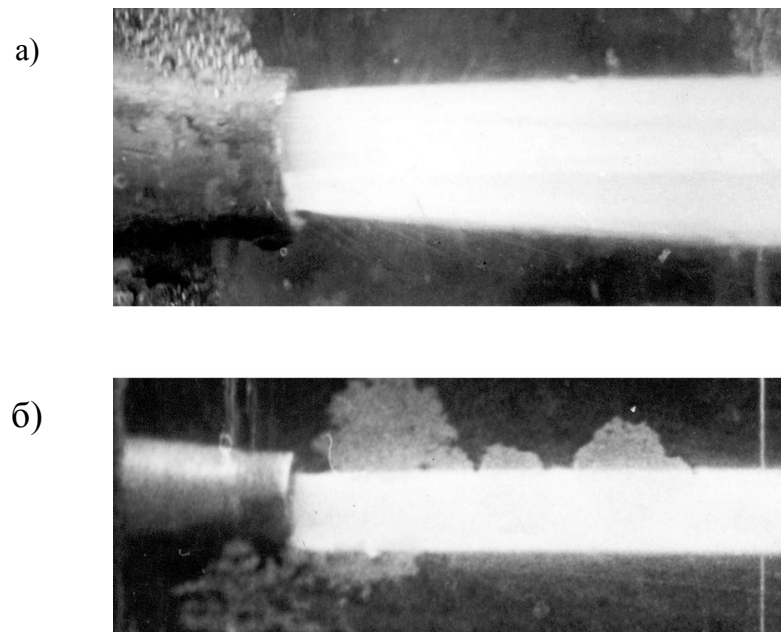


Рис. 3. Угол расширения струи  
а) давление  $P_H = 0,4 \text{ кг/см}^2$ ; б) давление  $P_H = 0,9 \text{ кг/см}^2$

$$\operatorname{tga} = c \operatorname{Re}^{0,5} Fr^{0,125} \left( \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{вод}}} \right)^{0,5} \quad (5)$$

Эти формулы позволяют определить угол расширения. И только после этого можно вычислить оптимальные параметры водовоздушного эжектора.

Диаметр камеры смешения:

$$d_{\text{КС}} = d_{\text{Н}} + 2l_p \operatorname{tga} \quad , \quad (6)$$

где  $d_{\text{Н}}$  - диаметр насадка;  $l_p$  - расстояние от насадка до камеры смешения;  $l_p = (4 - 6) d_{\text{Н}}$

Значение 4 принимается для эжекторов с большим значением противодавления, а 6 для малых. Длина камеры смешения составляет 6-10  $d_{\text{КС}}$ , а диффузора  $l_{\text{Д}} = 6d_{\text{КС}}$ .

Диаметр насадка определяется по известным из гидравлики формулам, по заданным значениям давления перед насадком и расхода воды.

Полученные оптимальные конструктивные параметры дают возможность определить объемный коэффициент эжекции:

$$U_0 = \frac{aP_p - P_c}{P_H (l_n \rho_c - b l_n \rho_H)} \quad , \quad (7)$$

где  $P_p$ ,  $P_c$ ,  $P_n$  давления соответственно: рабочей жидкости (воды) перед насадком, водовоздушной смеси на выходе диффузора, в приемной камере;

$\rho_c$ ,  $\rho_n$  - плотности водовоздушной смеси и всасываемого воздуха;

$a$ ,  $b$  - коэффициенты, учитывающие потери энергии рабочей (воды) и эжектируемой (воздуха) жидкости.

Коэффициент  $b$  с достаточной степенью точности можно принимать равным «1», т.к. энергия эжектируемого потока мала и скорость движения воздуха незначительна.

По результатам экспериментальных исследований определен коэффициент  $a$ :

$$a = \varphi \frac{9.5 + P_n 10^{-5}}{5.8 \frac{P_p}{P_c} + 8}, \quad (8)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости насадка.

Еще раз подчеркиваем, что значение коэффициента  $a$ , определенного по зависимости (8), справедливо только для эжектора с оптимальными конструктивными параметрами.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Проведенные эксперименты показали, что эжекторы с конструктивными параметрами, определённые по вышеприведенным формулам, имеют КПД равный 0,25-0,30. При этом испытывался так называемый «классический» эжектор, состоящий из насадка, камеры смешения и диффузора. В настоящее время всё чаще применяют эжекторы с удлиненной камерой смешения без диффузора. Сконструировать и испытать такие эжекторы предстоит в ближайшем будущем.

#### Список литературы

1. Берман Л.Д. Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов / Л.Д. Берман, Г.И. Ефимочкин // Теплоэнергетика. – 1964. – №7. – С. 44-48.
2. Кореннов Б.Е. Исследование водовоздушных эжекторов с удлиненной цилиндрической камерой смешения: автореф. дис. канд. техн. наук / Б.Е. Кореннов. – М.: ВТИ, 1980. – 23 с.
3. Лямаев Б.Ф. Применение водовоздушных эжекторов для откачки воздуха из центробежных насосов. Водоснабжение и сан. / Б.Ф. Лямаев // Техника. – 1966. – №10 – С. 11-13.
4. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1970. – 288 с.
5. Яценко А.Ф. Исследование струи водовоздушного эжектора / А.Ф. Яценко, Т.А. Устименко // Наукові праці ДонНТУ. – 2006. – Вып. 113. – С. 281-285.

Стаття надійшла до редколегії 02.11.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кононенко А.П.

**О.Ф. Яценко, Т.О. Устименко.** Теоретичні та експериментальні дослідження водоповітряного ежектора. Отримані залежності дозволяють визначити оптимальні конструктивні параметри водоповітряного ежектора і тим самим підвищити його коефіцієнт ежекції та ККД.

**Ключові слова:** ежектор, струмінь, насадок, камера зсуву, дифузор, кут розширення, коефіцієнт ежекції.

**A. Yatsenko, T. Ustimenko.** Theoretical and Experimental Water-Air Ejector Studies. The dependences, which were obtained, allow us to determine the optimal design parameters of water-air ejector and thus improve its efficiency and coefficient of ejection.

**Keywords:** ejector, jet, nozzle, camera shifts, diffuser, angle of expansion, coefficient of ejection.

© Яценко А.Ф., Устименко Т.А., 2012