

## МЕТОДИКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТРУЙНОГО НАСОСА С КОЛЬЦЕВЫМ СОПЛОМ

Струйные насосы (гидроэлеваторы) с центральным соплом (СНЦС) применяются в народном хозяйстве СССР для подъема воды из скважин, удаления воды из шахт, котлованов, при опускании кессонов, для добычи со дна водоемов нерудных материалов (песок, гравий), при гидротранспорте руды, угля и т.д. [1, 2, 3, 4]. Наметилась тенденция использования струйных насосов для отвода рыбы от сеток рыбозащитных сооружений и в составе гидромеханических рыбоподъемников (рис. 1) [5, 6, 7]. Широкому применению СНЦС в качестве рыбонасосов будет, в частности, способствовать создание простой и надежной методики их расчета и проектирования. Решению этого вопроса и посвящена данная статья.

Допустим, что наличие рыбы в воде, проходящей через насос, не снижает его напора  $H$  и подачи  $Q_B$  [4]. Тогда основная зависимость для расчета СНКС

$$h = f(q, K_c, K_b, \xi_c, \xi_b, \xi_k, \xi_d), \quad (1)$$

где  $h = H/H_c$  и  $q = Q_B/Q_c$  — соответственно относительные напор и расход (здесь и далее по тексту приняты индексы: в — всасывающий патрубок; с — сопло; к — камера смещения; д — диффузор);  $H, H_c$  — статические напоры струйного насоса и рабочего потока перед соплом;  $Q_B, Q_c$  — объемные расходы, м<sup>3</sup>/с;  $K_c = \omega_c/\omega_k$ ;  $K_b = \omega_b/\omega_k$  — коэффициенты сечения;  $\omega_c, \omega_b, \omega_k, \omega_d$  — площади поперечных сечений, м<sup>2</sup>;  $\xi_c, \xi_b, \xi_k, \xi_d$  — коэффициенты сопротивления ( $\sum \xi = \xi_k + \xi_d$ ).

Уравнение энергии для струйного насоса при отсутствии подпора или вакуума на входе во всасывающий патрубок может быть записано в виде

$$E_c = E_d + \Delta E_c + \Delta E_b + \Delta E_k + \Delta E_d + \Delta E_{см}, \quad (2)$$

где  $E_c, E_d$  — полные энергии рабочего потока на входе в сопло и на срезе диффузора, вт;  $\Delta E_c, \Delta E_b, \Delta E_k, \Delta E_d, \Delta E_{см}$  — потери энергии в элементах струйного насоса, вт;

$$E_c = \rho_c g Q H_c; \quad (3)$$

$$E_d = \rho_k g Q H; \quad (4)$$

$$\Delta E_c = \rho_c g Q_c \Delta h_c; \quad (5)$$

$$\Delta E_b = \rho_b g Q \Delta h_b; \quad (6)$$

$$\Delta E_k = \rho_k g Q_k \Delta h_k; \quad (7)$$

$$\Delta E_d = \rho_k g Q_k \Delta h_d. \quad (8)$$

В зависимостях (3) ... (8)  $\rho_c, \rho_b, \rho_k$  — плотности потоков, движущихся через сопло, всасывающий патрубок и камеру смещения;  $\Delta h_c, \Delta h_b, \Delta h_k, \Delta h_d$  — потери напора в элементах струйного насоса, м.

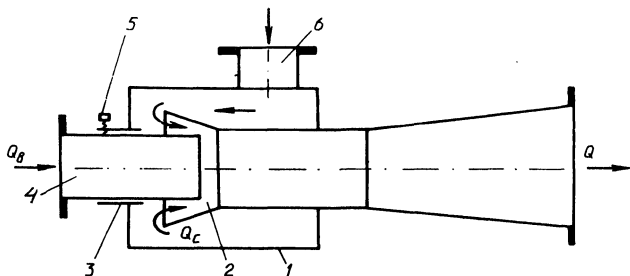


Рис. 1. Принципиальная схема струйного насоса с кольцевым соплом:  
 1 – корпус; 2 – сопло; 3 – направляющий элемент; 4 – всасывающий патрубок; 5 – стопорный винт; 6 – патрубок для ввода рабочей воды.

Для определения потерь энергии на смешение потоков можно использовать зависимость, приведенную в [4], представив ее в виде

$$\Delta E_{\text{см}} = \rho_c \frac{Q_c^3}{2\omega_c^2} + \rho_B \frac{Q_B^3}{2\omega_B^2} + \rho_K \frac{Q_K^3}{2\omega_K^2} - \rho_c \frac{Q_c^2 Q_K}{\omega_c \omega_K} - \rho_B \frac{Q_B^2 Q_K}{\omega_B \omega_K} \quad (9)$$

Введем в (2) зависимости (3)...(9) и разделим левую и правую части на произведение  $\rho_c g Q_c$ :

$$\begin{aligned} \frac{\rho_c g Q_c H_c - \rho_K g Q_K H}{\rho_c g Q_c} &= \left( \frac{\rho_c g Q_c \Delta h_c + \rho_B g Q_B \Delta h_B}{\rho_c g Q_c} + \right. \\ &+ \frac{\rho_K g Q_K \Delta h_K + \rho_K g Q_K \Delta h_{\text{д}} + \rho_c \frac{Q_c^3}{2\omega_c^2} + \rho_B \frac{Q_B^3}{2\omega_B^2}}{\rho_c g Q_c} + \\ &\left. + \frac{\rho_K \frac{Q_K^3}{2\omega_K^2} - \rho_c \frac{Q_c^2 Q_K}{\omega_c \omega_K} - \rho_B \frac{Q_B^2 Q_K}{\omega_c \omega_K}}{\rho_c g Q_c} \right). \quad (10) \end{aligned}$$

Величины  $\Delta h_c$ ,  $\Delta h_B$ ,  $\Delta h_K$  и  $\Delta h_{\text{д}}$  можно представить в виде следующих выражений:

$$\Delta h_c = \xi_c \frac{Q_c^2}{2g\omega_c^2}; \quad \Delta h_K = \xi_K \frac{Q_K^2}{2g\omega_K^2}; \quad (11)$$

$$\Delta h_{\text{в}} = \xi_{\text{в}} \frac{Q_{\text{в}}^2}{2g \omega_{\text{в}}^2}; \quad \Delta h_{\text{д}} = \xi_{\text{д}} \frac{Q_{\text{к}}^2}{2g \omega_{\text{к}}^2},$$

Введем в (10) зависимости (11), а также отношения

$$Q_{\text{в}}/Q_{\text{с}} = q; \quad Q_{\text{к}}/Q_{\text{с}} = (Q_{\text{с}} + Q_{\text{в}})/Q_{\text{с}} = 1 + q; \quad \rho_{\text{в}}/\rho_{\text{с}} = \rho'; \quad \rho_{\text{к}}/\rho_{\text{с}} = \rho''$$

для случая, когда  $\rho_{\text{с}} = \rho_{\text{в}} = \rho_{\text{к}}$  и  $\rho' = \rho'' = 1$ , получим:

$$\begin{aligned} H_{\text{с}} - (1 + q)H = & \frac{1}{2} \left( \xi_{\text{с}} \frac{Q_{\text{с}}^2}{g \omega_{\text{с}}^2} + \xi_{\text{д}} q \frac{Q_{\text{в}}^2}{g \omega_{\text{в}}^2} + (1 + q) \frac{Q_{\text{к}}^2}{g \omega_{\text{к}}^2} (\xi_{\text{к}} + \right. \\ & \left. + \xi_{\text{д}}) + \frac{Q_{\text{с}}^2}{g \omega_{\text{с}}^2} + q \frac{Q_{\text{в}}^2}{g \omega_{\text{в}}^2} + (1 + q) \frac{Q_{\text{к}}^2}{g \omega_{\text{к}}^2} - \frac{2Q_{\text{с}} Q_{\text{к}}}{g \omega_{\text{с}} \omega_{\text{к}}} - \right. \\ & \left. - q^2 \frac{2Q_{\text{в}} Q_{\text{к}}}{g \omega_{\text{в}} \omega_{\text{к}}} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

Разделим (12) на зависимость, полученную в [8]:

$$H_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{с}}^2}{2g \omega_{\text{с}}^2} (1 + \xi_{\text{с}}) - \frac{Q_{\text{в}}^2}{2g \omega_{\text{в}}^2} (1 + \xi_{\text{в}}), \quad (13)$$

Умножим числитель и знаменатель полученной дроби на  $(\omega_{\text{к}}/Q_{\text{с}})^2$  и, используя безразмерные параметры  $h$ ,  $K_{\text{с}}$ ,  $K_{\text{в}}$  и выражение  $Q_{\text{к}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{в}}$ , получим функцию (1) в окончательном виде:

$$h = \frac{1}{1 + q} \left( 1 - \frac{A}{B} \right), \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} A = & \frac{1 + \xi_{\text{с}}}{K_{\text{с}}^2} + \frac{1 + \xi_{\text{в}}}{K_{\text{в}}^2} q^3 + (1 + \Sigma \xi) (1 + q)^3 - \\ & - 2 \left( \frac{1}{K_{\text{с}}} + \frac{q^2}{K_{\text{в}}} \right) (1 + q); \quad B = \frac{1 + \xi_{\text{с}}}{K_{\text{с}}^2} - \frac{1 + \xi_{\text{в}}}{K_{\text{в}}^2} q^2. \end{aligned}$$

Коэффициент полезного действия насоса (по рыбе)

$$\eta_{\text{р}} = \frac{\rho_{\text{р}}}{\rho_{\text{в}}} c q h,$$

где  $\rho_{\text{р}}$  — плотность рыбы во всасывающем патрубке, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  — концентрация рыбы во всасывающем патрубке:  $c = 0, 10, \dots, 0,4$ .

Графические зависимости  $h = f(q)$ , построенные по формуле (14),

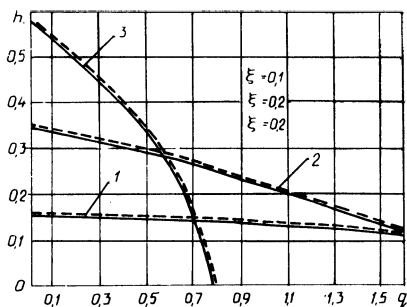


Рис. 2. Зависимость  $h = f(q)$ :  
 1 -  $K_c = 0,1$ ; 2 -  $K_c = 0,25$ ; 3 -  
 $K_c = 0,5$ . Сплошные линии - расчеты  
 по (14); пунктирные - расчеты по  
 [8]  $\xi_B = 0,1$ ;  $\xi_c = 0,2$ ;  $\Sigma\xi = 0,2$ .

имеются на рис. 2. Для сравнения там же представлены и результаты расчетов, выполненных по формуле, рекомендованной для расчета эжекторных грунтозаборов землесосных снарядов [8] при  $\xi_c = 0,2$ ;  $\xi_B = 0,1$ ;  $\Sigma\xi = 0,2$ .

**Пример. Исходные данные:**

$H = 3$  м;  $Q_B = 190$  м<sup>3</sup>/ч ( $52,8 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с);  $c = 0,4$ ; допустимая безопасная для рыбы разность скоростей  $\Delta v^* = v_c - v_B = (8 - 12,5)$  м/с.

Расчетные параметры:  $d_B$  - внутренний диаметр всасывающего патрубка насоса;  $d_K$  - внутренний диаметр камеры смешения насоса;  $l_K$  - длина камеры смешения;  $\delta_c$  - ширина кольцевого сопла;  $d_D$  - максимальный внутренний диаметр диффузора;  $v_B$ ;  $v_c$ ;  $\Delta v$ ;  $v_K$ ;  $Q_c$ ;  $Q_K$ ;  $\eta_p$ .

**Решение.** Основываясь на данных [ 1, 2, 5 ], принимаем  $K_c = 0,25$ ;  $K_B = 1 - K_c = 0,75$ ;  $\xi_B = 0,1$ ;  $\xi_c = 0,2$ ;  $\Sigma\xi = 0,2$ ;  $q = 0,7$ . По формуле (14) находим  $h = 0,253$ . Из соотношений  $h = H/H_c$  и  $q = Q_B/Q_c$  определяем, что  $H_c = 11,9$  м и  $Q_c = 75,5 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с;  $= 270$  м<sup>3</sup>/ч;  $Q_K = Q_c + Q_B = 128,5 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с = 460 м<sup>3</sup>/ч.

Величину  $\omega_K$  рассчитываем по формуле

$$\omega_K = \frac{1}{K_c K_B} \left( \frac{(1 + \xi_c) K_B^2 Q_c^2 - (1 + \xi_B) K_c^2 Q_B^2}{2gH_c} \right)^{0,5},$$

которую нетрудно получить из (13), имея в виду, что  $\omega_c = K_c \omega_K$ ;  $\omega_B = K_B \omega_K$ . Тогда

$$\omega_K = 2,11 \times 10^{-2} \text{ м}^2; \omega_c = 0,53 \times 10^{-2} \text{ м}^2; \omega_B = 1,58 \times 10^{-2} \text{ м}^2; d_K = \sqrt{\frac{4\omega_K}{\pi}} =$$

$$= 0,164 \text{ м}; d_B = \sqrt{\frac{4\omega_B}{\pi}} = 0,142 \text{ м}; \delta_c = \frac{d_K - d_B}{2} = 0,011 \text{ м}; v_K = \frac{Q_K}{\omega_K} = 6,09 \text{ м/с};$$

$$v_B = \frac{Q_B}{\omega_B} = 3,32 \text{ м/с}; v_c = \frac{Q_c}{\omega_c} = 14,6 \text{ м/с}; \Delta v = v_c - v_B = 11,28 \text{ м/с} < v^*; d_D = \sqrt{\frac{4Q_K}{\pi v_D}} =$$

$$= 3,28 \times 10^{-1} \text{ м, где } v_D \text{ принимаем равной } 1,5 \text{ м/с}; l_D = \frac{d_D - d_K}{2 \operatorname{tg} 4^\circ} = 1,17 \text{ м}; l_K = 4 \frac{d_K}{K_c} =$$

$$= 0,66 \text{ м}; \eta = 0,4 \cdot 0,7 \cdot 0,253 = 0,072.$$

Мощность потока воды, проходящего через сопло,

$$N_c = \rho_B g Q_c H_c = 8,83 \text{ кВт.}$$

Мощность электродвигателя рабочего насоса (без учета потерь энергии в подводящих трубах)

$$N = N_c / \eta_H = 8,83 : 0,7 = 12,61 \text{ кВт,}$$

где  $\eta_H$  – КПД рабочего насоса.

$$\begin{aligned} \text{Максимальная длина перекачиваемой рыбы } l &= 1,8 d_B = 1,8 \cdot 0,142 \approx 0,28 \text{ м; } b = \\ &= 0,8 d_B \approx 0,8 \cdot 0,142 = 0,11 \text{ м.} \end{aligned}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фридман Б.Э. Гидроэлеваторы. – М., 1960. – 321 с. 2. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве. – М., 1970. – 415 с. 3. Гриб В.К., Морев А.Н. Комплексная механизация прудового рыбоводства. – М., 1973. – 309 с. 4. Терентьев А.В., Миллер Б.Н., Чернигин Н.Ф. Гидравлическая механизация в рыбной промышленности. – М., 1956. – 300 с. 5. Минкин Ю.В., Мускевич Г.Е. Выживаемость молоди рыб в эжекторных рыбоподъемниках // Рыбное хозяйство. – 1982. – № 9. – С. 28–30. 6. Докукин М.М., Муравенко Т.А. Струйный аксиальный насос // Рыбное хозяйство. – 1985. – № 9. – С. 65–66. 7. Мускевич Г.Е., Минкин Ю.В. К выбору оптимальных размеров и формы кольцевого сопла гидроэлеваторов – рыбоподъемников в рыбозащитных комплексах водозаборных сооружений // Вопросы повышения эффективности существующих оросительных систем. – Новочеркасск, 1981. – Вып. 14. – С. 28–32. 8. Мустафин Х.Т. Расчет эжектора на воде и гидросмеси // Нерудные строительные материалы. – Тольятти, 1968. – Вып. 24. – С. 16–20.

УДК 532.526

И.В. ПОВОРОТНЫЙ, Д.А. ПРОКОПЧУК

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ ЧАСТИЧНО ОГРАНИЧЕННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Несмотря на практическое применение частично ограниченных турбулентных затопленных струй, формируемых осесимметричным источником в струйных завесных системах, закономерности их распространения являются тем не менее малоизученными как в теоретическом, так и в экспериментальном аспектах.

Среди немногочисленных публикаций по данному вопросу наиболее актуальной по полученным результатам является работа [1], в которой были исследованы параметры течения частично ограниченных затопленных струй в диапазоне отстояния струеформирующего источника от плоской стенки  $h = (0 - 3,5) d$  на расстояниях  $X \approx 60$  калибров.

Однако практическое приложение таких типов течения требует знания закономерностей их развития на более значительном удалении от источника истечения порядка  $X = (200 - 400) d$  и при больших величинах отстояния  $- h$ .