

**Конструювання ежекційних насосів для гідравлічного транспортування.
Характеристики струминних насосів для гідравлічного транспортування**

**Constructing of ezhekciynikh of pumps is for hydraulic transporting.
Descriptions of stream pumps are for hydraulic transporting**

У пропонованих статтях розглядаються принципи і методи конструювання і проектування гідроструминних насосів для гідротранспортування суміші

Ключові слова: струминний апарат, характеристики насосів, сопла, коефіцієнти швидкості

In the offered articles principles and methods of constructing and planning of гідроструминних pumps are examined for гідротранспортування of mixture

Keywords: current apparatus, descriptions of pumps, snuffled, coefficients of speed

Для розрахунку струминних апаратів, які використовуються для гідротранспортування твердих речовин, можна використовувати рівняння, що відносяться до гідроструминних насосів для однорідних рідин. Але при виводі цих рівнянь крім впливу на процеси дисперсного складу домішок приходиться враховувати що робоча, пасивна і змішані середовища будуть мати різну густину. Найбільш повні результати досліджень струминних насосів для гідравлічного транспорту наведені в роботах [1...6].

Рівняння характеристики гідроструминного насоса з центральним соплом. Для розглядуваного випадку з урахуванням різниці в густинах робочого ρ_p , пасивного ρ_n і змішаного ρ_c потоків по даним роботи [4], можна записати наступне рівняння:

$$\frac{\Delta\delta_{\tilde{n}}}{\Delta\delta_{\delta}} = \frac{\Delta\delta_{\tilde{n}2\tilde{a}}}{\Delta\delta_{\delta1\tilde{a}}} = \varphi_1^2 \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{\dot{e}^2 \rho_{\delta} d_c^2 / d_{\tilde{a}}^2}{\rho_i (1 - d_c^2 / d_{\tilde{a}}^2)} - (2 - \varphi_3^2) \frac{\rho_{\delta} d_c^2}{\rho_{\tilde{n}} d_{\tilde{a}}^2} (1 + \dot{e})^2 \right]. \quad (1)$$

Під об'ємним коефіцієнтом підсмоктування гідроструминного насоса u в даному випадку розуміють суму двох окремих коефіцієнтів підсмоктування – по твердому тілу u_m і по рідині u_p , тобто

$$u = u_m + u_p, \quad (2)$$

де

$$u_m = \frac{Q_m}{Q_{роб}}; \quad u_p = \frac{Q_p}{Q_{роб}}. \quad (3), (4)$$

Густини підсмоктуваного ρ_n і змішаного ρ_c середовищ можна виразити через густини робочого рідкого середовища $\rho_{роб} = \rho_p$ і твердого тіла ρ_m .

Для підсмоктуваного середовища маємо баланс маси

$$\rho_p Q_p + \rho_m Q_m = \rho_n Q_n. \quad (5)$$

Поділимо всі члени рівняння (5) на Q_p і з урахуванням залежностей (2)...(4), отримаємо

$$\rho_p u_p + \rho_m u_m = \rho_n (u_p + u_m), \quad (6)$$

звідки

$$\rho_n = \frac{\rho_p u_p}{u_p + u_m} + \frac{\rho_m u_m}{u_p + u_m}. \quad (7)$$

Аналогічним шляхом можна отримати наступний вираз для густини змішаного середовища ρ_c :

$$\rho_c = \frac{\rho_p (1 + u_p)}{1 + u_p + u_m} + \frac{\rho_m u_m}{1 + u_p + u_m}. \quad (8)$$

Введемо наступне позначення:

$$\alpha_p = \frac{u_p}{u_m}. \quad (9)$$

Тоді вираз (2) можна представити у наступному вигляді

$$u = u_m (1 + \alpha_p). \quad (10)$$

До рівняння характеристик входять відношення густин $\rho_{роб}/\rho_n = \rho_p/\rho_n$ і $\rho_{роб}/\rho_c = \rho_p/\rho_c$. Відшукаємо їх значення з використанням виразів (7) і (8):

$$\frac{\rho_{роб}}{\rho_n} = \frac{1 + \alpha}{\frac{\rho_m}{\rho_p} + \alpha_p} \quad \text{і} \quad \frac{\rho_{роб}}{\rho_c} = \frac{1 + u_m (1 + \alpha_p)}{1 + u_m \frac{\rho_m}{\rho_p + \alpha_p}}. \quad (11); (12)$$

Позначимо $\rho_m/\rho_p = \tilde{\rho}_m$ і отримаємо кінцеве рівняння:

$$\frac{\rho_{роб}}{\rho_c} = \frac{1 + u_m (1 + \alpha_p)}{1 + u_m (\tilde{\rho}_m + \alpha_p)}. \quad (13)$$

Підставимо в рівняння (1) замість u , $\rho_{роб}/\rho_n$, $\rho_{роб}/\rho_c$ їх значення з рівнянь (2), (11) і (13), отримаємо рівняння характеристик струминних насосів для гідравлічного транспортування твердих речовин у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_c}{\Delta p_{роб}} = \varphi_1^2 \frac{d_c^2}{d_z^2} \left\{ 2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{1 + \alpha_p}{\tilde{\rho}_m + \alpha_p} \frac{d_c^2 / d_z^2}{1 - d_c^2 / d_z^2} u_m^2 (1 + \alpha_p)^2 - \right. \\ \left. - (2 - \varphi_3^2) \frac{1 + u_m (1 + \alpha_p)}{1 + u_m (\tilde{\rho}_m + \alpha_p)} \frac{d_c^2}{d_z^2} [1 + u_m (1 + \alpha_p)]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Якщо підставити у цей вираз $\alpha_p = 0$, отримаємо рівняння характеристик струминних насосів при сухому завантаженні твердої речовини (без розбавлення рідиною) у гідроструминний насос:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_c}{\Delta p_{роб}} = \varphi_1^2 \frac{d_c^2}{d_z^2} \left\{ 2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{1}{\tilde{\rho}_m} \frac{d_c^2 / d_z^2}{1 - d_c^2 / d_z^2} u_m^2 (1 + \alpha_p)^2 - \right. \\ \left. - [1 + u_m]^2 - (2 - \varphi_3^2) \frac{1 + u_m}{1 + u_m \tilde{\rho}_m} \frac{d_c^2}{d_z^2} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

При $\tilde{\rho}_m = 1$ і $u_m = u$ рівняння (15) перетворюється в рівняння для унарної (однорідної) рідини.

Автори [4] рекомендують приймати для попередніх розрахунків наступні значення коефіцієнтів швидкості в рівнянні характеристик струминних насосів для гідравлічного транспортування твердих речовин: $\varphi_1=0,95$; $\varphi_2=0,875$; $\varphi_3=0,81$; $\varphi_4=,83$. Ці величини підлягають наступному уточненню на основі випробувань струминних насосів на натурній гідросуміші.

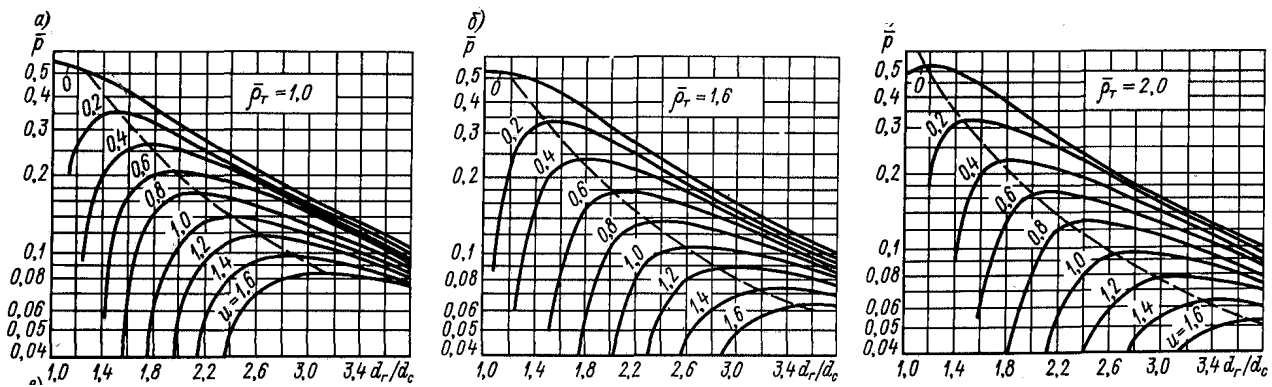


Рис.1. Нормальні безрозмірні гідравлічні характеристики струминних насосів для гідравлічного транспортування твердих речовин у режимі сухого завантаження ($\alpha_p = 0$)

На рис.1 наведено узагальнені нормальні гідравлічні характеристики струминних насосів для гідравлічного транспортування твердих речовин в координатах $\tilde{p} = \Delta p_c / \Delta p_{роб}$ і d_r/d_c , аналогічні характеристикам струминних насосів для однорідних рідин. Рівні значення коефіцієнтів підсмоктування u з'єднані кривими $u = \text{const}$. Розрахунки виконано при названих вище значеннях коефіцієнтів швидкості для режиму сухого завантаження гідроелеватора ($\alpha_p = 0$) при $\tilde{\rho}_m = 1,0$ (рис.1,а); $\tilde{\rho}_m = 1,6$ (рис.1,б); і $\tilde{\rho}_m = 2,0$ (рис.1,в). Розгляд рис.1 показує, що при збільшенні $\tilde{\rho}_m$ зменшується створюваний струминним насосом безрозмірний тиск $\tilde{p} = \Delta p_c / \Delta p_{роб}$. Так, якщо $\tilde{\rho}_m = 1,0$ і коефіцієнт підсмоктування $u = 1,0$ гідроструминний насос в оптимальному режимі створює тиск $p_{\square m} = 0,12$, то при $\tilde{\rho}_m = 1,6$ і $\tilde{\rho}_m = 2,0$ відповідні тиски дорівнюють 0,103 і 0,098.

На рис.1 оптимальні режими роботи гідроструминних насосів позначаються штриховими лініями. Розгляд цього рисунка показує, що зі збільшенням $\tilde{\rho}_m$ оптимальні значення відношення основних розмірів струминного насоса d_r/d_c зміщуються в бік більших значень. Так, при коефіцієнті підсмоктування $u = u_m = 1,0$ значенням густини $\tilde{\rho}_m = 1,0; 1,6; 2,0$ відповідають значення відношень d_r/d_c відповідно 2,4; 2,7; 2,8.

У зв'язку з тим, що коефіцієнти швидкості задаються практично довільно для різних елементів струминних насосів [4], то розрахунки за формулами (14) і (15) та графікам (рис.1) носять орієнтовний характер і можуть використовуватися тільки для якісного аналізу режимів роботи таких насосів. Варто пам'ятати, що збільшення відносної густини пасивного потоку $\tilde{\rho}_m$ зменшує створюваний насосом напір і зміщує оптимальні значення відношення діаметрів d_r/d_c у бік більших величин.

Дослідження струминних насосів для гідравлічного транспортування виконані [2, 5...7]. У цих дослідженнях наводяться рівняння гідравлічних нормальних характеристик з отриманими експериментальними значеннями коефіцієнтів опору окремих конструктивних елементів струминних насосів. У роботі [6] подано рівняння безрозмірної характеристики зануреного в рідину гідроструминного насоса (гідроелеватора), для випадку коли тиск на всмоктуванні можна орієнтовно вважати рівним атмосферному:

$$\beta = \frac{m^2 - (1 + \alpha_m)(1 + u)^2 \sum \zeta}{(1 + \alpha_m)(1 + \zeta_c) m^2}, \quad (16)$$

де β – безрозмірний напір гідроструминного насоса, який дорівнює відношенню напору гідроелеватора H_c до напору робочої води $H_{роб}$; α_m – масовий коефіцієнт підсмоктування, який визначається з формули $\alpha_m = \rho_n Q_n / (\rho_{роб} Q_{роб})$; $u = Q_n / Q_{роб}$; $m = d_c^2 / d_r^2$; $\sum \zeta$ – сума коефіцієнтів гідравлічних опорів на вході до камери змішування $\zeta_{вх}$, камери змішування і дифузора ζ_d ($\sum \zeta = \zeta_{вх} + \zeta_c + \zeta_d$); ζ_c – коефіцієнт опору робочого сопла.

Виконанні у [6] дослідження стосуються гідроструминних насосів з геометричними параметрами $d_r/d_c = 2,0 \dots 4,5$. При цьому перекачувалося вугілля, гравій, доменний шлак, відходи збагачення руд, мартенівський пил, пісок.

При використанні отриманих залежностей було побудовано сімейство безрозмірних гідравлічних характеристик гідроелеваторів, оптимальні значення яких описуються залежністю

$$\beta_{onm} = 0,242\alpha_m^{-0,779}. \quad (17)$$

Це рівняння можна використовувати безпосередньо під час підбору і розрахунку струминних насосів для гідротранспорту. Крім цього запропонована конструкція зануреного струминного насоса, яка дозволяє всмоктувати гідросуміш в умовах завалу гідроелеватора пороною. Всмоктувальний отвір гідроелеватора розташований горизонтально. На горизонтальній ділянці зони всмоктування насоса нижче осі виконано приймальне вікно для надходження гідросуміші. Розміщення приймального вікна нижче осі горизонтальної ділянки гідроелеватора дозволяє запобігати закупорювання патрубків під час роботи гідроелеватора в умовах завалу його твердими частинками.

За даними [6], зменшення втрат напору на вході до гідроелеватора підвищило ефективні сит всмоктування гідросуміші в 2,5...3,0 рази у порівнянні з раніше використовуваними конструкціями. Максимально досягнуто концентрацію гідросуміші у напірному трубопроводі при перекачуванні вугілля, крупністю частинок не більше 25 мм, склала $s_{V1} = V_m/V_p \approx 0,67$.

У роботах [2, 5] виведено рівняння гідравлічних характеристик струминних насосів для гідротранспорту і виконаний аналіз залежності гідравлічних показників від відношення густин пасивного і робочого потоків. Автори відмічають одну важливу для гідротранспорту обставину. У зв'язку з тим, що активний потік при змішуванні з пасивним віддає тільки частину своєї енергії пасивному потоку, залишкова енергія активного потоку на виході зі струминного насоса може бути корисно використана для транспортування твердих речовин. При забезпеченні оптимальної концентрації гідросуміші в напірному трубопроводі залишкова енергія активного потоку повністю використовується в технологічному процесі, і ефективність гідроструминного насоса суттєво зростає. Це особливо стосується сухого завантаження, коли струминний насос працює не тільки як гідротранспортний засіб, але і як змішувач, який створює необхідну для перекачування твердої речовини трубами концентрацію його в рідині. Активний потік розбавляє тверду речовину до необхідної концентрації, не вимагаючи добавки додаткової кількості рідини.

Оскільки розрахунок струминного насоса спрямований, зазвичай, на забезпечення максимального ККД, то спосіб його розрахунку має принципове значення. У роботі [2] відмічається, що під час розрахунку струминних насосів для систем напірного гідротранспорту оптимальний режим рекомендується приймати при відношенні активних витрат Q_p до сумарних $Q_p + Q_n$, рівному 0,3...0,6, тобто при $u = 2,0...0,7$. У дійсності при раціональному використанні струминних насосів оптимальним режимам відповідають більші значення відношення $Q_p/(Q_p + Q_n)$ (режим сухого завантаження). При режимах сухого завантаження ККД гідротранспорту за допомогою струминного насоса наближається до 0,5, що відповідає ККД ґрунтових відцентрових насосів. Відмічається, що зміна відношення $Q_p/(Q_p + Q_n)$ при незмінних характеристиках змішаного потоку в кінці дифузора змінює і оптимальне значення відношення d_s/d_c і, як наслідок відношення площ поперечних перерізів камери змішування і напірного трубопроводу.

Під час роботи гідроструминних насосів на малокоцентрованих гідросумішах для розрахунків можна використовувати гідравлічні і кавітаційні характеристики струминних насосів для чистих рідин.

Особливу увагу при розрахунках струминних насосів для гідротранспорту коцентрованих сумішів необхідно звертати на кавітаційні режими роботи. При цьому тиск на всмоктуванні $p_{н1к}$ слід визначати з урахуванням міркувань, викладених у кінці попередньої статті. В окремих випадках необхідно враховувати зменшення тиску, викликаного різницею густин гідросуміші у всмоктувальній трубі, зануреній під шар рідини і чистої рідини. З урахуванням сказаного тиск у вхідному перерізі 1_k всмоктувального патрубка струминного насоса p_n слід визначати за формулою

$$p_n = p_a \left[H_{ec} \rho_{c.c} g + \sum h + \rho_{c.c} g \frac{v_{ec}^2}{2g} + H_{зан} \left(\frac{\rho_{c.c}}{\rho_p} - 1 \right) \right], \quad (18)$$

де p_a – атмосферний тиск; H_{ec} – геометрична висота всмоктування, яка відраховується від

поверхні рідини в джерелі живлення до перерізу 1κ ; Σh – місцеві і лінійні втрати напору у всмоктувальному трубопроводі; $H_{зан}$ – заглиблення всмоктувального отвору під шар рідини.

Величину p_n , визначену за формулою (18), можна використати при розрахунку отвору $(p_p - p_\kappa)/(p_n - p_\kappa)$. Значення коефіцієнта u_κ , при якому виникає кавітація у струминному насосі для гідро- транспортування, слід визначати при $\varphi_4 = 0,83$, а не при $\varphi_4 = 0,925$, як це було прийнято при розрахунках гідроструминних насосів. Тому при використанні кавітаційних характеристик, отриманих графічним шляхом, значення u_κ , необхідно множити на величину $0,83/0,925 = 0,9$, тобто приймати

$$u_\kappa^{2.m} \approx 0,9u_\kappa, \quad (19)$$

де $u_\kappa^{2.m}$ – значення коефіцієнта підсмоктування струминного насоса для гідротранспорту, за якого виникає кавітація; u_κ – значення коефіцієнта підсмоктування, визначене для гідроструминних насосів, які працюють на чистих рідинах.

Для перекачування гідросуміші, особливо такої що містить крупні домішки, рекомендується використовувати струминні насоси з кільцевим соплом. У відомих першоджерелах [8, 9] не наводяться дані по роботі таких насосів на висококонцентрованих гідросумішах. Використовуючи рівняння безрозмірних нормальних характеристик кільцевих струминних насосів [9] при відповідних значеннях густин робочої, пасивної і змішаної рідин, розрахованих за формулами (7) і (8) можна побудувати їх гідравлічні характеристики. Так само як і для струминних насосів з центральним соплом, значення коефіцієнтів опору конструктивних елементів струминного насоса при цьому повинні бути зміненими. Відсутність дослідних даних поки що не дозволяє указати межі зміни коефіцієнтів опору струминних насосів з кільцевим соплом. У першому наближенні можна вважати, що при перекачуванні висококонцентрованої гідросуміші зменшення безрозмірного тиску, створюваного струминним насосом з кільцевим соплом, буде пропорційним збільшенню густини змішаного середовища. Так, при $\rho_c = 1,5\rho_p$ значення безрозмірного тиску, визначене за допомогою графіків, необхідно для режиму максимального ККД зменшити у 1,5 рази. Зауважимо, що ступінь впливу збільшення густини (концентрації) гідросуміші на безрозмірний тиск при зменшенні коефіцієнта підсмоктування для кожного струминного насоса буде зменшуватися, а при його збільшенні, навпаки, зростати.

Література

1. Болотских Н.С. Водопонижение. Харьков: Вища школа, 1981.– 144 с.
2. Ложков Е.Ф. Исследование гидротранспортных установок с гидроэлеваторами. Челябинск: Челябинский политехн. ин-т, 1974.– 23 с.
3. Подвидз Л.Г., Кирилловский Ю.Л. Расчет оптимального струйного насоса для работы на разнородных жидкостях// Тр. ВИГМ, 1963, в.32.– С. 114-128.
4. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1970.– 288 с.
5. Темнов В.К. Основы теории жидкостных эжекторов. Челябинск: Челябинский политехн. ин-т, 1971.– 89 с.
6. Щербина Г.С. Исследование и совершенствование гидроэлеваторов для гидротранспорта сыпучих материалов. М.: Ин-т горного дела, 1979.– 24 с.
7. Болотских Н.С. Строительное водопонижение в сложных гидрогеологических условиях. К.: Будівельник, 1976.– 112 с.
8. Грабовский А.М. Гидравлический расчет параметров эжектора// Изв. вузов. Стр-во и архитект. 1973, №8.– С. 95-99.
9. Скорубко А.М. Гидродинамические исследования струйных насосов. М.: МВТУ, 1978.– 16с.