

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРДЛОВИНИХ СТРУМИННИХ НАСОСІВ

О.П. Мельников, О.В. Паневник

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 49258,  
e-mail: gidro@nimg.edu.ua

*Проведено аналіз відомих досліджень, присвячених струминним насосам. Обґрунтовано необхідність у подальших дослідженнях характеристик струминних насосів. Визначено критерій оцінки повноти експериментального дослідження характеристики струминного насоса. Запропонована схема лабораторної установки для коректного визначення «повної» характеристики струминних насосів. Сформульовано завдання подальших досліджень*

Ключові слова: струминний насос, ежектор, відносний напір, коефіцієнт ежекції.

*Проанализировано известные исследования, посвященные струйным насосам. Обоснована необходимость в дальнейшем исследовании характеристик струйных насосов. Определен критерий полноты экспериментального исследования характеристики струйного насоса. Предложена схема лабораторной установки для корректного определения «полной» характеристики струйных насосов. Сформулированы задачи дальнейших исследований*

Ключевые слова: струйный насос, эжектор, относительный напор, коэффициент эжекции.

*The article analyzes the known research on the jet pump. The necessity for further study of the characteristics of jet pumps. The criteria of completeness of experimental Research features a jet pump. Proposed a scheme of laboratory setup for the correct definition of "full" characteristics of jet pumps. The problems for further research*

Keywords: jet pump, ejector, head ratio, flow ratio.

Струминний насос було винайдено Джеймсом Томсоном в 1852 році, а в 1859 році Ж.Б.Вентурі вперше використав розроблений ним апарат для практичних цілей. Основоположником теорії струминних насосів вважають Цейнера і Ренкіна, які опублікували свої роботи в 1863 і 1870 роках. Великий внесок у вивчення струминних апаратів в період 1930-1960 рр. внесли радянські вчені Г.А.Аронс, К.К.Баулін, А.Н.Ложкін, Н.А.Ржаніцин та ін. При подальшому удосконаленні струминних насосів вдалося підняти їх ККД до рівня 40%.

Однак у зв'язку зі складністю процесів, що відбуваються при змішуванні потоків та взаємній передачі енергії від активного потоку до пасивного, на даний час відсутня загальна аналітична теорія для розрахунку гідроструминних насосів без використання емпіричних величин. Відсутність загальної теорії турбулентності, а саме, можливості визначення довжини, на якій відбувається повне перемішування потоків робочої та ежектованої рідин, а також невідомість значення коефіцієнтів кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліса) та кількості руху (коефіцієнт Буссінеска) для характерних перерізів струминного насоса вказує на незавершеність проведених досліджень. Для розрахунку гідроструминних насосів на даний час пропонуються методи, засновані на: теоріях змішування двох потоків та поширення струменів у масі статичної або рухомої рідини, а також механіці тіл змінної маси. Тому проведення комплексу досліджень струминних насосів є актуальним завданням, що має практичне значення не тільки у процесі буріння свердловин, але і для інших галузей, де використовуються насоси.

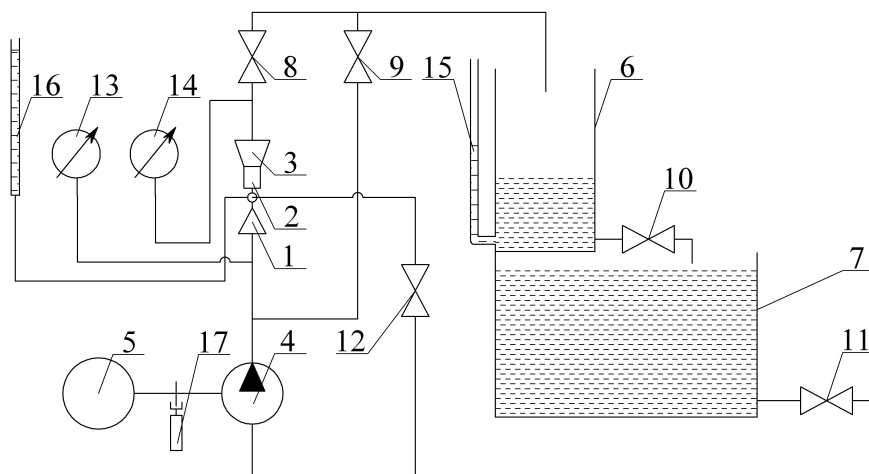
Відомі експериментальні дослідження характеристики струминних насосів таких авторів як Сазонов Ю.А. [1], Онацко Р.Г. [2], та характеристики на базі експериментальних досліджень Каменєва П.Н. [3], Кіріловського Ю.Л. [4], Соколова Е.А. [6] та інших.

За матеріалами розглянутих експериментальних досліджень неможливо повною мірою визначити параметри струминних насосів в області малих напорів та граничних коефіцієнтів ежекції, що унеможливує проведення подальших досліджень струминних насосів задля покращення їх основних робочих характеристик.

З усього вище сказаного впливає необхідність у більш детальному розгляді відомих експериментальних досліджень характеристики струминних насосів, встановленні їх недоліків та розробленні методики для визначення характеристик струминних насосів на усьому робочому діапазоні.

Основною задачею експериментальних досліджень є отримання експериментальних даних, на основі яких можна розробити рекомендації щодо проектування струминних насосів. Крім того існує потреба в перевірці справедливості відомих теоретичних методик з розрахунку струминних насосів.

Відоме експериментальне дослідження [1] характеристики струминного насоса на експериментальному стенді, схема якого зображена на рисунку 1. До схеми стенду входять такі основні елементи: блок струминного насоса (сопло 1, камери змішування 2, дифузор 3), силовий гвинтовий насос 4 з двигуном постійного струму 5, мірний бак 6 та ємність з водою 7. Елементи



1 – сопло; 2 – камера змішування; 3 – дифузор; 4 – гвинтовий насос; 5 – двигун постійного струму; 6, 7 – бак; 8-12 – засувка; 13, 14 – манометр; 15, 16 – п'єзометр; 17 – тахометр

Рисунок 1 – Схема стенда для випробування струминних насосів (за Сазоновим Ю.А. [1])

нти стенда об'язані системою трубопроводів, оснащеною засувками 8-12. Для вимірювання тиску використовуються зразкові манометри 13, 14. Рівень рідини в баку 6 та тиск у всмоктувальній лінії струминного насоса визначається рівнем рідини в скляних трубках 15, 16. Частоту обертів вала гвинтового насоса 4 реєструють цифровим тахометром 17.

Безрозмірні параметри для побудови дослідної характеристики струминного насоса визначаються за формулами [1]:

відносна витрата:

$$i = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_C} - 1; \quad (1)$$

відносний напір:

$$h = \frac{\left( P_{14} + \frac{v_{14}^2}{2} \rho \right) - \left( P_{16} + \frac{v_{16}^2}{2} \rho \right)}{\left( P_{13} + \frac{v_{13}^2}{2} \rho \right) - \left( P_{16} + \frac{v_{16}^2}{2} \rho \right)}, \quad (2)$$

де:  $v_{14}$ ,  $v_{13}$ ,  $v_{16}$  – швидкості потоку відповідно в місці встановлення манометра 14, 13 та мірної трубки 16;

$Q_{\Sigma}$  – сумарна подача на виході струминного насоса;

$Q_C$  – подача гвинтового насоса;

$P_{13}$ ,  $P_{14}$ ,  $P_{16}$  – тиски в трубопроводі за показами відповідних манометрів 13, 14 та мірної трубки 16;

$\rho$  – густина рідини.

За допомогою лабораторної установки було отримано характеристику струминного насоса, зображену на рисунку 2.

Для оцінки повноти експериментального дослідження необхідно ввести безрозмірний коефіцієнт  $\beta$  - коефіцієнт повноти визначення напору (рис. 2):

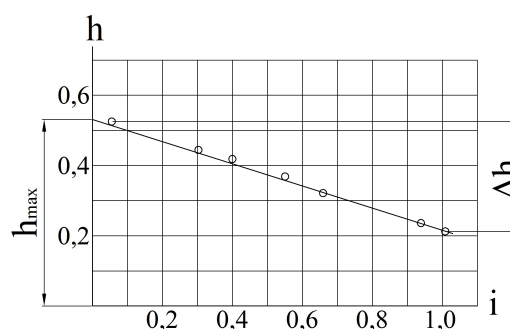
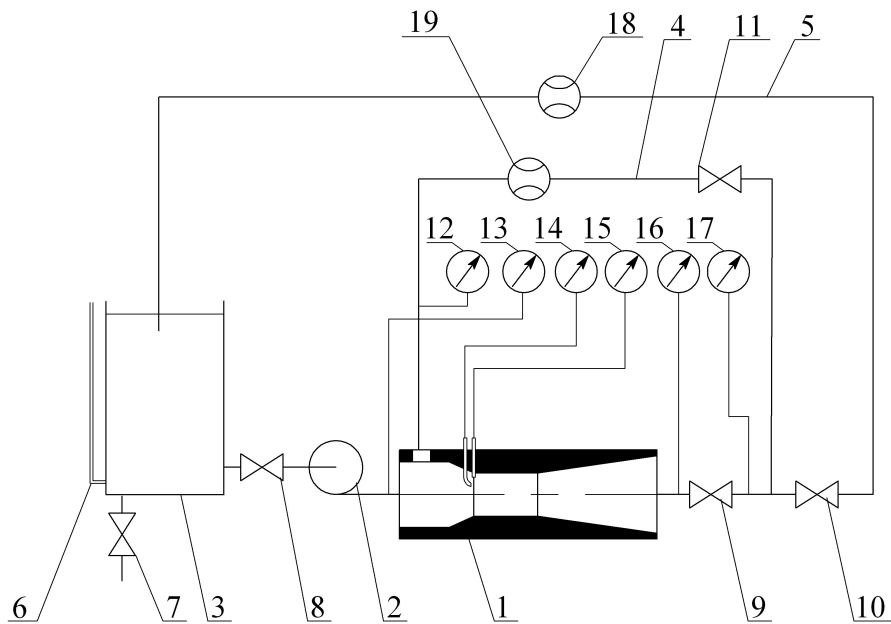


Рисунок 2 – Характеристика струминного насоса (за Сазоновим Ю.А. [1])

$$\beta = \frac{\Delta h}{h_{\max}}. \quad (3)$$

Звідси, експериментальне дослідження буде найбільш повним при  $\beta = 1$  (для лабораторної установки, описаної в роботі Сазонова Ю.А. [1], згідно з прикладом, зображеного на рисунку 2,  $\beta = 0,57$ ).

В роботі [2] Онацко Р.Г. розроблено лабораторний стенд для визначення «зворотної» характеристики струминного насоса. Лабораторний стенд складається з струминного насоса 1 (рис. 3), відцентрового насоса 2, приймального резервуара 3, всмоктувальної 4 та напірної 5 ліній. Приймальний резервуар обладнано трубою рівнепокажчика 6 та зливним патрубком з вентилем 7. Регулювання режиму роботи відцентрового та струминного насосів здійснюється за допомогою засувки 8, 9, 10: засувка 8 дає змогу змінювати подачу відцентрового насоса шляхом зміни величини тиску у його всмоктувальній лінії, а режим роботи струминного насоса регулюється шляхом зміни тиску змішаного потоку засувкою 9, не впливаючи безпосередньо на значення тиску інжектваного потоку. Зміна ступеня відкриття засувки 9 дає можливість регулювати режим роботи струминного



1 – струминний насос; 2 – відцентровий насос; 3 – приймальний резервуар;  
4 – всмоктувальна лінія; 5 – напірна лінія; 6 – рівне-показчик; 7 – зливний патрубок з вентиляем;  
8, 9, 10, 11 – засувка; 12, 13, 14, 15, 16, 17 – манометр; 18, 19 – витратомір

Рисунок 3 – Лабораторна установка для дослідження струминних насосів [2] (за Онацко Р.Г.)

насоса також шляхом зниження або підвищення витрати робочого потоку. Враховуючи обернено-пропорційний зв'язок між напором та витратою відцентрового насоса, зростання гідравлічного опору його напірної лінії неминує викликає зниження витрати потоку. Засувка 10 дозволяє здійснювати регулювання режиму роботи струминного насоса шляхом зміни подачі відцентрового насоса. Співвідношення тисків змішаного та інжектованого потоків при цьому залишається незмінним, оскільки зміна тиску на виході струминного насоса по всмоктувальній лінії 4 безпосередньо передається в приймальну камеру. Засувка 11 призначена для регулювання режиму роботи струминного насоса в умовах незмінної подачі відцентрового насоса. Зміна ступеня відкриття засувки 11 дає змогу регулювати гідравлічний опір всмоктувальної лінії та режим роботи струминного насоса.

Для вимірювання швидкості у вхідному перерізі камери змішування в проточній частині струминного насоса розміщено прилад Піто – Прандтля. Враховуючи напрям руху інжектованого потоку при зворотному режимі роботи струминного насоса, п'єзометрична трубка встановлена у вхідному перерізі камери змішування, а трубка повного напору зміщена в напрямку за потоком.

Для даного випадку вираз для визначення відносного напору струминного насоса має вигляд [2]:

$$h = \left\{ P_{MЗ} + P_{MI} + \rho \cdot g \cdot (z_3 - z_i) + \frac{\rho}{2} \cdot \left[ \frac{(Q_{ID} + Q_{HD})^2}{f_3^2} - \frac{Q_{ID}^2}{f_i^2} \right] \right\} \times \left\{ P_{MP} - P_{MI} + \rho \cdot g \cdot (z_P - z_i) + \frac{\rho}{2} \cdot \left[ \frac{(Q_{HD} + Q_{ID})^2}{f_P^2} - \frac{Q_{ID}^2}{f_i^2} \right] \right\}^{-1}, \quad (4)$$

де:  $P_{MЗ}$ ,  $P_{MI}$ ,  $P_{MP}$  – покази манометрів на лініях змішаного, інжектованого та робочого потоків;

$z_3$ ,  $z_i$ ,  $z_P$  – геометричне положення точок підключення манометрів відносно центральної осі струминного насоса, встановлених відповідно на лініях змішаного, інжектованого та робочого потоків;

$Q_{HD}$ ,  $Q_{ID}$  – дослідні значення витрат робочого та інжектованого потоків.

Коефіцієнт інжекції визначається формулою

$$i = \frac{Q_{ID}}{Q_{HD}}. \quad (5)$$

Характеристика струминного насоса, отримана за допомогою лабораторної установки Онацко Р.Г. [2], зображена на рисунку 4.

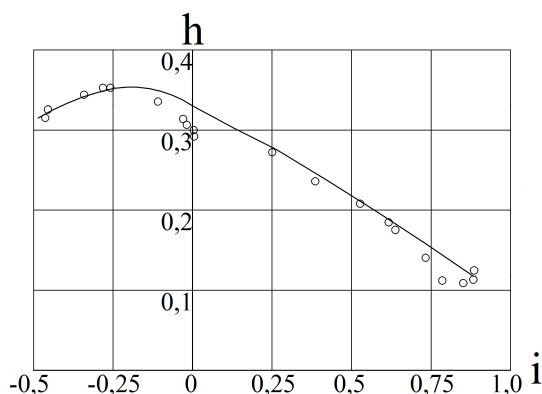


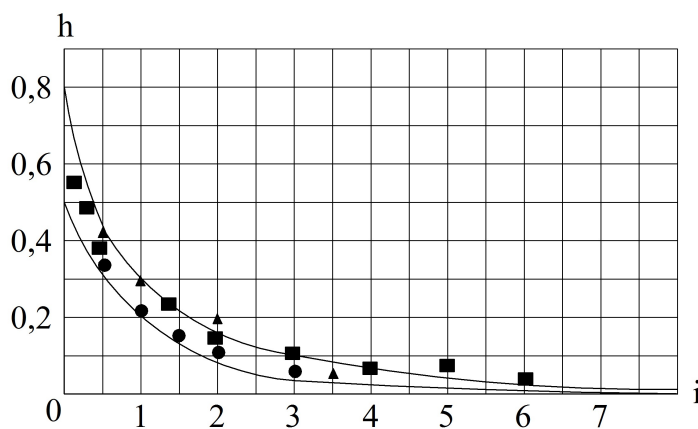
Рисунок 4 – Характеристика струминного насоса в дослідженні Онацко Р.Г. [2]

Для установки, розробленої Онацко Р.Г. [2] характерний коефіцієнт повноти визначення напору  $\beta = 0,6$ .

Для прояснення загальної ситуації щодо експериментальних досліджень характеристики струминних насосів слід розглянути результати загальноновідомих досліджень з даного питання. На рисунку 5 зображено характеристики струминних насосів за даними різних авторів, а саме, Е.Я.Соколова [5, 6] ( $\beta = 0,58$ ), Ю.Л.Кіріловського [4, 5] ( $\beta = 0,66$ ) та П.Н.Каменєва [3, 5] ( $\beta = 0,46$ ).

Узагальнена інформація з приводу повноти отримання експериментальних даних за характеристикою струминних насосів згідно даних різних авторів подано в таблиці 1.

Як видно з проведеного огляду експериментальних досліджень, відомі експериментальні характеристики не відображають повною мірою характеристику струминного насоса. Для визначення джерела цієї проблеми, необхідно більш детально розглянути лабораторні установки та стенди, описані вище.



● – Е.Я.Соколов; ■ – Ю.Л.Кіріловський; ▲ – П.Н.Каменєв

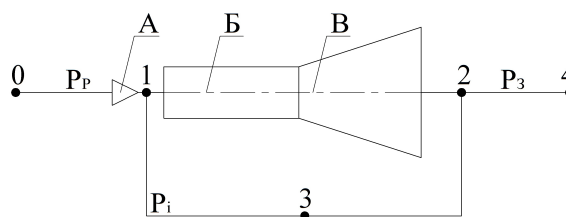
Рисунок 5 – Характеристики струминних насосів за даними різних авторів [3-6]

Таблиця 1 – Оцінка повноти експериментальних даних характеристики струминних насосів

Автор дослідження	$k_{CH}$	$h_{max}$	$\beta$
Сазонов Ю.А. [1]	2,14	0,52	0,57
Онацко Р.Г. [2]	4,94	0,34	0,6
Соколов Е.Я. [5, 6]	-	0,5	0,58
Кіріловський Ю.Л. [4, 5]	-	0,5	0,66
Каменєв П.М. [3, 5]	-	0,8	0,46
Хлебніков І.А. [5]	-	0,8	0,32
Фридман Б.Е. [5]	-	0,8	0,38
Керіс та На [5]	-	0,8	0,31

Спільним недоліком даних конструкцій є використання силових насосів в системі з струминним насосом, що унеможливує отримання точної характеристики струминного насоса. Оскільки в процесі дослідження визначаються параметри системи «насос-трубопровід-насос», а не «насос-трубопровід», як би це мало бути.

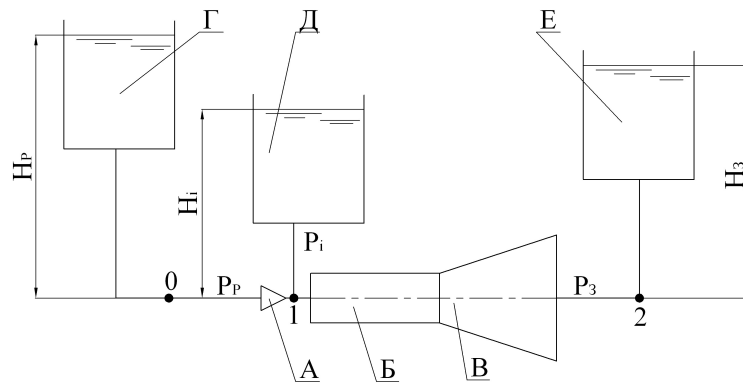
Попри те що, на перший погляд, описані лабораторні установки мають відмінні компонувки, вони працюють за одним принципом (рис. 6).



А – робоча насадкa; Б – камера змішування; В – дифузор

Рисунок 6 – Принципова схема лабораторної установки

Суттєвою перевагою лабораторної установки, описаної Онацко Р.Г. [2], є те, що за її допомогою можна визначити «зворотну» характеристику струминного насоса та відносний напір



А – робоча насадка; Б – камера змішування; В – дифузор;  
Г, Д, Е – напірні баки робочого, інжектованого та змішаного потоків відповідно

**Рисунок 7 – Принципова схема локаторної установки для визначення «повної» характеристики струминних насосів**

$h$  при  $i = 0$ . Даний ефект досягається за допомогою регулювання тиску на виході з дифузора. Проте жодна з описаних лабораторних установок чи експериментальних стендів не дає змоги визначити коефіцієнт ежекції  $i$  при  $h = 0$ . Для визначення умов, за яких  $h = 0$ , запишемо загальне рівняння для визначення  $h$  для випадку зображеного на рисунку 6:

$$h = \frac{P_3 - P_i}{P_p - P_i} \quad (6)$$

Отже, за умови:  $P_3 - P_i = 0 \Rightarrow P_3 = P_i$  відносний напір  $h$  буде рівний нулю, що неможливо при даній схемі дослідження, оскільки гідравлічний опір лінії 2-3-1 (рис. 6) не може бути рівним нулю.

Для того, щоб усунути вище згаданий недолік, експериментальне визначення характеристики струминних насосів необхідно виконувати за схемою, зображеною на рисунку 7.

Лабораторна установка, принципова схема якої зображена на рисунку 7 дає змогу визначити характеристику струминних насосів за різних значень ежекції шляхом зміни висоти  $H_i$  розташування напірного бака, підключеного до точки 1. Водночас, експериментальне визначення коефіцієнта ежекції  $i$  при  $h = 0$  характеристики струминного насоса досягається регулюванням висоти розташування  $H_i, H_3$  напірних баків, підключених до точок 1 та 2. «Зворотній» режим роботи струминного насоса можна досягти регулюванням висоти розташування  $H_3$  напірного бака, підключеного до точки 2.

Отже, в процесі виконаного аналізу вдалося встановити принципову схему лабораторної установки, для визначення характеристик струминних насосів в області малих напорів та граничних коефіцієнтів інжекції, тобто у всьому робочому діапазоні.

Завданням подальших досліджень буде розробка детальної гідравлічної схеми запропонованої лабораторної установки, і проведення за її допомогою експериментальних досліджень з визначення характеристик струминних

насосів та перевірка достовірності досліджень згідно з теоретичними розрахунками з точки зору «повноти» експериментальних досліджень.

### Література

- 1 Сазонов Ю.А. Разработка устройства, снижающего дифференциальное давление на забое скважины и повышающего скорость бурения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю.А.Сазонов. – Москва, МИНГ им. И.М. Губкина, 1989. – 176 с.
- 2 Онацко Р.Г. Обгрунтування раціональних режимів роботи свердловинних струминних насосів: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.12. / Р.Г.Онацко. - Івано-Франківськ. – 172 с.
- 3 Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве / П.Н.Каменев. – М.: Стройиздат, 1970. – 416 с.
- 4 Кириловский Ю.Л. Рабочий процесс и основы расчета струйных насосов / Ю.Л.Кириловский, Л.Г.Подвидз // Труды ВИГМ. – 1960. – Вып. 26. – С. 96-135.
- 5 Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф.Лямаев. – Л., Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 256 с.
- 6 Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я.Соколов, Н.М.Зингер. – М., Энергия, 1970. – 288 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
06.06.11

Рекомендована до друку професором  
Б.В. Конєсн