

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИННИХ СТРУМИННИХ НАСОСІВ

О.В. Паневник, І.Ф. Концур, І.Д. Лівак, Р.Г. Онацко, В.В. Михайлюк, В.І. Кобльовський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,  
e-mail: no@nuing.edu.ua

Струминні насоси широко застосовуються в нафтогазовій галузі, а саме: при бурінні свердловин; цементуванні обсадних колон; освоєнні, дослідженні, експлуатації та підземному ремонті свердловин; інтенсифікації методів нафтогазоконденсатовилучення; в системах збору, підготовки нафти та газоконденсату. Незважаючи на простоту конструкції струминного насоса та відсутність рухомих частин робочі процеси, що супроводжують змішування в ньому рідин, вивчені недостатньо. Для досліджень струминного насоса розроблено лабораторну установку, за допомогою якої визначено напірні і енергетичні характеристики та встановлено величини конструктивних і режимних параметрів, що забезпечують оптимальні умови його експлуатації. Отримані графічні залежності подані у вигляді поліноміальних функцій і дозволяють підвищити точність прогнозування характеристик свердловинних струминних насосів.

Ключові слова: струминний насос, насадка, камера змішування, робоча рідина, інжектований потік, коефіцієнт інжекції, відносний напір, напірна характеристика, енергетична характеристика.

Струйные насосы широко применяются в нефтегазовой отрасли. а именно: при бурении скважин: цементировании обсадных колонн: освоении. исследовании. эксплуатации и подземном ремонте скважин: интенсификации методов нефтегазоконденсатодобывания: в системах сбора. подготовки нефти и газоконденсата. Несмотря на простоту конструкции струйного насоса и отсутствие подвижных частей рабочие процессы, сопровождающие смешивания в нем жидкостей изучены недостаточно. Для исследований струйного насоса разработана лабораторная установка. с помощью которой определены напорные и энергетические характеристики и установлены величины конструктивных и режимных параметров. обеспечивающих оптимальные условия его эксплуатации. Полученные графические зависимости представлены в виде полиномиальных функций и позволяют повысить точность прогнозирования характеристик скважинных струйных насосов.

Ключевые слова: струйный насос. насадка. камера смешения. рабочая жидкость. инжектированный поток. коэффициент инжекции, относительный напор, напорная характеристика, энергетическая характеристика.

Jet pumps are widely used in oil and gas industry namely during the process of wells drilling, casing cementing, developing, exploration, operating and underground wells repair, intensification of methods for oil extraction and gas condensate, gathering facilities, oil and gas condensate preparing. In spite of simplicity of the jet pump design and absence of moving parts production processes accompanying fluids mixing have not been studied enough. To research the jet pump a laboratory installation has been developed by means of which pressure and energy characteristics were defined and values for design and profile parameters to ensure optimized conditions for its using. Obtained graphical curves are given in the form of polynomial functions and allow to increase the accuracy of characteristics prediction for well jet pumps.

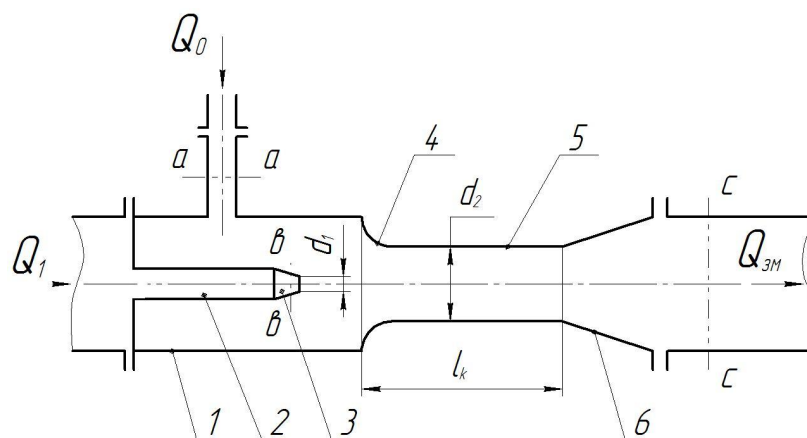
Keywords: jet pump, nozzle, mixing chamber, production fluid flow, injection fluid, relative pressure, pressure characteristics, power characteristics.

На даний час ежекторні пристрої широко застосовуються в нафтогазовій галузі, а саме: при бурінні свердловин та ліквідації аварій при їх будівництві; цементуванні обсадних колон; освоєнні; дослідженні; експлуатації та підземному ремонті свердловин; інтенсифікації методів нафтогазоконденсатовилучення; в системах збору підготовки нафти, газу та газоконденсату.

В процесі будівництва свердловин можливі такі області використання ежекторних пристроїв:

- 1) буріння свердловин з відбором керна;
- 2) зниження диференціального тиску в свердловині з метою підвищення швидкості буріння;
- 3) створення додаткового гідравлічного зусилля на долото;
- 4) буріння в умовах поглинання бурового розчину;

- 5) первинне розкриття продуктивних горизонтів;
- 6) інтенсифікація промивання та оптимізація характеру розподілу тисків на вибої свердловини;
- 7) буріння свердловин великого діаметра;
- 8) створення пульсуючого режиму промивання привибійної зони і динамічного навантаження на долото;
- 9) промивання піскових пробок під час освоєння та ремонту свердловин;
- 10) ліквідація прихоплень бурильної колони;
- 11) видалення предметів залишених на вибої в процесі буріння;
- 12) виклик припливу;
- 13) підйом води з свердловини під час буріння та освоєння.



1 – приймальна камера; 2 – підведення робочого потоку; 3 – робоча насадка; 4 – вхідна ділянка камери змішування; 5 – камера змішування; 6 – дифузор

Рисунок 1 – Схема струминного насоса

Попри значну кількість розроблених конструкцій, ефективність використання свердловинних струминних насосів не завжди відповідає необхідним вимогам, що значною мірою стримує їх застосування. Це пов'язано з незадовільним вивченням теоретичних питань розробки та використання ежекційних пристроїв. При проектуванні конструкцій струминних насосів не враховуються специфічні умови їх експлуатації в свердловинах, внаслідок чого приймаються наближені значення конструктивних та експлуатаційних параметрів на основі практичного досвіду їх використання.

Недостатнє вивчення питань, пов'язаних з проектуванням та застосуванням струминних апаратів, знижує ефективність та поширеність їх використання при реалізації окремих процесів у нафтогазовій галузі. Це свідчить про актуальність робіт, спрямованих на теоретичне та експериментальне дослідження свердловинних ежекційних систем.

Не зважаючи на просту конструкцію струминного апарата та відсутність рухомих частин, робочі процеси, що супроводжують змішування рідин, вивчені недостатньо. В цих умовах зростає роль експериментальних методів досліджень струминних насосів, які дозволяють підвищити ефективність застосування ежекційних технологій. Більшість відомих експериментальних досліджень стосується визначення характеристик низьконапірних струминних насосів [1,2], які не знайшли застосування в нафтогазовій промисловості. Недостатній об'єм проведених експериментальних досліджень високонапірних струминних насосів зумовив вибір мети досліджень, результати яких наведені в даній статті.

Мета досліджень – визначення напірних та енергетичних характеристик високонапірних струминних насосів та встановлення значень конструктивних та режимних параметрів, які забезпечують оптимальні умови експлуатації свердловинних ежекційних систем.

У процесі експериментальних досліджень застосовувались струминні насоси, відношення

площі камери змішування та робочої насадки для яких відповідно становить 2,56; 3,024; 4,938; 7,112.

З метою збільшення точності вимірів експериментальні параметри, що визначають режим роботи струминного насоса, доцільно визначити для сталої величини витрати робочого потоку. Остання умова передбачає використання для привода лабораторного стенда насоса, який має жорстку характеристику. Цій умові відповідають насоси об'ємного типу. Однак, використання таких насосів має свої недоліки:

- висока вартість конструкції і силового привода експериментального стенда;
- нерівномірність подачі робочої рідини;
- ступінчастий характер регулювання подачі.

Використання відцентрових насосів дає змогу усунути ці недоліки.

У процесі планування експериментальних досліджень визначимо показники, які характеризують робочий процес струминного насоса.

Режим роботи струминного насоса (рис.1) характеризують п'ять параметрів:

1. Витрата робочої рідини

$$Q_1 = V_1 \cdot S_1 = V_1 \cdot (\pi/4) \cdot d_1^2, \quad (1)$$

де:  $V_1$  – швидкість робочого потоку у вихідному перерізі робочої насадки;

$S_1$  – площа вихідного перерізу робочої насадки;

$d_1$  – діаметр вихідного перерізу робочої насадки.

2. Корисна подача

$$Q_0 = V_0 \cdot S_0 = V_0 \cdot (\pi/4) \cdot d_0^2, \quad (2)$$

де:  $V_0$  – швидкість інжектваного потоку у вхідному перерізі камери змішування;

$S_0$  – площа інжектваного потоку у вхідному перерізі камери змішування;

$d_0$  – діаметр камери змішування.

3. Робочий напір, що витрачається в насосі, рівний різниці напорів робочого потоку на вході в насос (переріз  $b-b$ ) та на виході з нього (переріз  $c-c$ ):

$$H_p = \frac{p_b}{\rho \cdot g} + \frac{v_b^2}{2 \cdot g} - \frac{p_c}{\rho \cdot g} - \frac{v_c^2}{2 \cdot g}. \quad (3)$$

4. Корисний напір, що створюється насосом і рівний різниці напорів рідини, що подається за насосом (переріз  $c-c$ ) та перед ним (переріз  $a-a$ ), –

$$H_p = \frac{p_c}{\rho \cdot g} + \frac{v_c^2}{2 \cdot g} - \frac{p_a}{\rho \cdot g} - \frac{v_a^2}{2 \cdot g}. \quad (4)$$

5. ККД струминного насоса рівне відношенню корисної потужності до витраченої

$$\eta = \frac{H_k \cdot Q_0}{H_p \cdot Q_1}, \quad (5)$$

де:  $H_p, H_k$  – робочий та корисний напір;

$p_a, p_b, p_c$  – тиск у характерних перерізах струминного насоса;

$v_a, v_b, v_c$  – швидкість потоку у характерних перерізах струминного насоса;

$\rho$  – густина рідини.

Енергія змішаного потоку перевищує енергію корисної подачі  $Q_0$ , але менша енергії робочого потоку  $Q_1$  перед входом в насос [3].

Попри низьке значення максимального ККД струминні насоси поширені завдяки простоті конструкції, малим габаритним розмірам та відсутності рухомих частин. Струминні насоси легко розмістити у важкодоступних місцях, ними можна подавати агресивні і забруднені рідини та виконувати змішування [4].

Середовище, що перебуває під більш високим тиском, називається робочим потоком. Витікаючи із великою швидкістю із насадки струминного насоса, робочий потік захоплює середовище, що має більш низький тиск (це середовище називається інжектванним (пасивним)). Як правило, в струминних насосах відбувається спочатку перетворення потенціальної енергії робочого потоку в кінетичну. Кінетична енергія робочого потоку частково передається пасивному потоку. В проточній частині відбувається вирівнювання швидкостей змішаних потоків, зворотнє перетворення кінетичної енергії змішаного потоку в потенціальну.

Основні конструктивні параметри струминного насоса – це діаметр робочої насадки та співвідношення площ перерізів камери змішування та робочої насадки, які приймаються в діапазоні: діаметр робочої насадки від 3 до 25 мм, співвідношення площ перерізів – від 1,5 до 20. Вибір цих параметрів здійснюється на основі практичного досвіду використання, виходячи з призначення струминного насоса, типу поверхневого та підземного обладнання, конструкції свердловини.

На ефективність роботи струминного насоса впливають такі геометричні параметри:

- співвідношення площі перерізів камери змішування та робочої насадки;
- відстань між робочою насадкою та камерою змішування;
- відносна довжина камери змішування;
- співвісність робочої насадки та камери змішування.

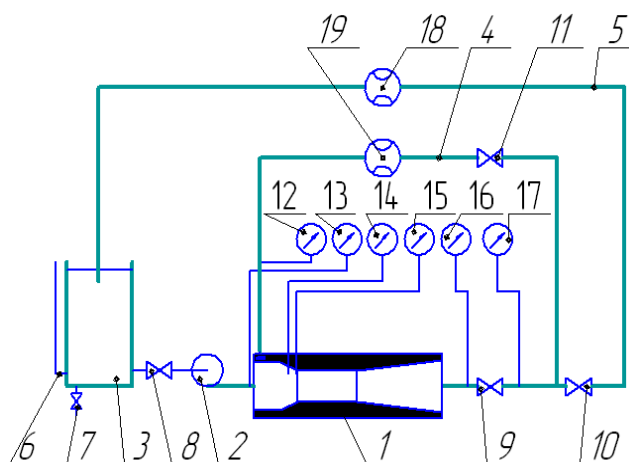
Для дослідження роботи струминного насоса в прямому і зворотному режимах була розроблена лабораторна установка (рис. 2).

Установка складається з струминного насоса 1, відцентрового насоса 2, приймального резервуара 3, всмоктувальної та вихідної лінії 4 та 5.

Приймальний резервуар 3 обладнаний трубою рівнепоказчика 6 та зливним патрубком з вентилем 7. Регулювання режиму роботи відцентрового та струминного насосів здійснюється за допомогою засувок 8, 9, 10, 11. Засувка 8 дозволяє змінювати подачу відцентрового насоса шляхом регулювання величини тиску на вхідній лінії. Засувка 9 дає змогу здійснювати регулювання режиму роботи струминного насоса шляхом зміни величини тиску змішаного потоку, не впливаючи безпосередньо на значення тиску інжектваного потоку. Оскільки розгалуження всмоктувальної лінії струминного насоса розміщене за потоком після засувки 9, зростання тиску змішаного потоку, викликане зміною ступеня її відкриття, не передається безпосередньо в приймальну камеру. Зміна ступеня відкриття засувки 9 дає можливість регулювати режим роботи струминного насоса також за рахунок зниження або зростання витрати робочого потоку. Враховуючи обернено-пропорційний зв'язок між напором та витратою відцентрового насоса, зростання гідравлічного опору його вихідної лінії неминуче викликає зниження витрати потоку. Засувка 10 уможливує регулювання режиму роботи струминного насоса шляхом зміни подачі відцентрового насоса. Співвідношення тисків змішаного та інжектваного потоків при цьому залишається незмінним, оскільки зміна тиску на виході струминного насоса всмоктувальною лінією 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 розміщений прилад Піто-Прандтля. Враховуючи напрям руху інжектваного 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.

Значення тисків у характерних перерізах гідравлічної системи струминного насоса вимірюється за допомогою манометрів 12-17. Мановакууметром 12 можна визначити надлишковий або вакууметричний тиск у вхідній лінії



1 – струминний насос; 2 – відцентровий насос (силовий привод); 3 – приймальний резервуар; 4 – всмоктувальна лінія; 5 – вихідна лінія; 6 – рівнепоказчик рідини; 7 – вентиль; 8,9,10,11 – засувки; 12,13,14,15,16,17 – манометри; 18,19 – витратоміри

Рисунок 2 – Схема установки для випробовувань струминного насоса

### Технічна характеристика лабораторної установки

Максимальна подача відцентрового насоса, м <sup>3</sup> /с	0,018;
Максимальний тиск відцентрового насоса, МПа	0,4;
Діаметр робочої насадки, мм	15,18,23,25;
Діаметр камери змішування, мм	40;
Величина регульованого зазору між робочою насадкою та камерою змішування, мм	15...30;
<i>Параметри двигуна силового приводу:</i>	
Частота обертів валу, хв. <sup>-1</sup>	2800;
Потужність, кВт	5,5 .

струминного насоса, причому якщо для прямого режиму роботи може мати місце як перевищення, так і нестача атмосферного тиску, то у випадку зворотного режиму тиск інжектваного потоку завжди має позитивні значення. Манометр 13 призначений для визначення тиску інжектваного потоку. Манометр 14 вказує на величину повного напору у вхідному перерізі камери змішування у випадку роботи струминного насоса у зворотному режимі. Манометром 15 можна визначити величину п'єзометричного тиску у вхідному перерізі камери змішування. Виходячи з конструкції вимірних трубок, покази манометрів 13, 14 відрізняються на величину швидкісного напору інжектваного потоку. Манометр 16 визначає величину тиску змішаного потоку струминного насоса. Покази манометра 17 відрізняються на величину гідравлічних втрат в проточній частині засувки 9. Манометр 17 призначений для визначення величини гідравлічного навантаження, що діє на струминний насос.

Витрата потоку в гідравлічній системі струминного насоса визначається за допомогою витратомірів (водяних лічильників) 18, 19. Витратомір 18 визначає подачу відцентрового насоса або витрату робочого потоку. Витратомір 19 призначений для виміру витрати потоку у всмоктувальній лінії струминного насоса і виконаний у вигляді двох однакових водяних лічильників, які встановлені таким чином, щоб

показувати витрату протилежно спрямованих потоків. Використання двох водяних лічильників дає змогу досліджувати як прямий, так і зворотній режим роботи струминного насоса.

Дослідження роботи струминного насоса в прямому режимі здійснювали в такій послідовності:

- 1) включали відцентровий насос 2 при закритих засувках 9 і 11;
- 2) повністю відкривали засувки 9 і 11;
- 3) напрям руху інжектваного потоку за показами витратоміра 19 відповідає прямому режиму роботи струминного насоса, тобто відбувається підсмоктування інжектваного потоку в приймальну камеру струминного насоса;
- 4) зменшували степінь відкриття засувки 11;
- 5) фіксували покази манометрів 12,13,16 та витратомірів 18 і 19;
- 6) повторювали ці виміри 8-11 разів для різних положень відкриття засувки 11 (відповідно для насадок діаметром 15,18,23,25 мм при максимальній чи мінімальній відстані від насадок до камери змішування);
- 7) останній вимір проводили для випадку постійно закритої засувки 11;
- 8) відносний напір ( $h$ ) визначаємо за формулою:

$$h = \frac{P_{16} - P_{12}}{P_{13} - P_{12}}, \quad (6)$$

Таблиця 1 – Результати досліджень для різних діаметрів і максимальної відстані ( $l_{max}=30$  мм) насадок до камери змішування струминного насоса

№ з/п	Тиск на вході струминного насоса, $P_{12}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Тиск на виході відцентрового насоса, $P_{13}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Тиск змішаного потоку, $P_{16}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Витрата інжектованого потоку, $Q_{19}$ , л/с	Витрата робочої рідини, $Q_H$ , л/с	Відносний напір, $h$	Коеф. інжекції, $i$	ККД струминного насоса, $\eta$ , %
Насадка діаметром 15 мм								
1	-0,2	2,4	0,06	7,15	7,47	0,1	0,96	10,6
2	-0,2	2,4	0,06	7,13		0,1	0,96	10,6
3	-0,2	2,4	0,06	7,03		0,1	0,95	10,5
4	-0,2	2,4	0,06	6,71		0,1	0,94	10,4
5	-0,25	2,46	0,069	6,21		0,117	0,83	11,0
6	-0,3	2,46	0,0702	5,52		0,134	0,73	11,3
7	-0,3	2,46	0,0702	4,92		0,134	0,65	10,0
8	-0,35	2,46	0,069	4,08		0,149	0,54	9,4
9	-0,45	2,4	0,0708	2,38		0,182	0,31	6,8
10	-0,6	2,4	0,06	0		0,22	0	0
Насадка діаметром 18 мм								
1	-0,35	2,88	0,069	8,7	11,3	0,129	0,77	11,4
2	-0,35	2,88	0,069	8,6		0,129	0,76	11,2
3	-0,35	2,88	0,069	8,5		0,142	0,75	12,4
4	-0,4	2,88	0,069	8,4		0,142	0,74	12,2
5	-0,4	2,88	0,069	8,1		0,142	0,71	11,7
6	-0,4	2,88	0,069	7,5		0,168	0,66	13,3
7	-0,5	2,88	0,069	6,9		0,168	0,61	12,3
8	-0,6	2,82	0,069	6,1		0,195	0,54	13,0
9	-0,65	2,82	0,069	5,3		0,207	0,47	12,2
10	-0,85	2,82	0,069	2,9		0,25	0,26	8,6
11	-1	2,76	0,069	0		0,284	0	0
Насадка діаметром 23 мм								
1	-0,3	2,4	0,15	8,0	14,5	0,166	0,56	11,1
2	-0,3	2,4	0,15	7,97		0,166	0,55	10,9
3	-0,3	2,4	0,15	7,9		0,166	0,54	10,7
4	-0,3	2,4	0,15	7,5		0,166	0,518	10,3
5	-0,35	2,4	0,15	7,1		0,195	0,489	10,9
6	-0,4	2,37	0,15	6,3		0,198	0,43	10,6
7	-0,45	2,34	0,15	5,6		0,24	0,385	10,4
8	-0,5	2,34	0,15	4,6		0,27	0,322	9,6
9	-0,9	2,34	0,15	2,2		0,324	0,155	7,4
10	-1	2,34	0,18	0		0,353	0	0
Насадка діаметром 25 мм								
1	-0,3	2,52	0,15	7,8	14,2	0,16	0,55	10,3
2	-0,3	2,52	0,15	7,8		0,161	0,55	10,29
3	-0,3	2,46	0,15	7,6		0,163	0,53	10,32
4	-0,4	2,46	0,15	7,1		0,175	0,5	11,88
5	-0,42	2,46	0,15	6,4		0,2	0,45	11,4
6	-0,5	2,46	0,15	5,4		0,225	0,38	10,6
7	-0,8	2,46	0,15	3,1		0,291	0,21	8,6
8	-1	2,46	0,18	0		0,341	0	0

де індекси відповідають позначенню манометрів на рис. 2;

9) коефіцієнт інжекції визначаємо за формулою:

$$i = \frac{Q_{19}}{Q_H}, \quad (7)$$

де індекс відповідає позначенням витратоміра на рис.2;

$Q_H$  – подача відцентрового насоса;

10) коефіцієнт корисної дії визначаємо за формулою:

$$\eta = \frac{i \cdot h}{(1 - h)}. \quad (8)$$

Результати досліджень зведені до табл. 1, 2.

Таблиця 2 – Результати досліджень для різних діаметрів і максимальної відстані ( $l_{max}=15$  мм) насадок до камери змішування струминного насоса

№ з/п	Тиск на вході струминного насоса, $P_{12}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Тиск на виході відцентрового насоса, $P_{13}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Тиск змішаного потоку, $P_{16}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Витрата інжектваного потоку, $Q_{19}$ , л/с	Витрата робочої рідини, $Q_H$ , л/с	Відносний напір, $h$	Коеф. інжекції, $i$	ККД струминного насоса, $\eta$ , %
Насадка діаметром 15 мм								
1	-0,3	3,06	0,069	8,27	8,38	0,109	0,98	11,9
2	-0,3	3,06	0,069	8,27		0,109	0,98	11,9
3	-0,32	3,06	0,069	8,27		0,115	0,98	12,7
4	-0,35	3,06	0,069	8,09		0,122	0,96	13,3
5	-0,38	3,06	0,069	7,12		0,123	0,84	11,7
6	-0,4	3,06	0,069	6,33		0,135	0,75	11,7
7	-0,5	3,06	0,069	5,36		0,159	0,63	11,9
8	-0,5	3,06	0,069	4,8		0,159	0,57	10,7
9	-0,63	3,06	0,069	2,56		0,189	0,3	6,9
10	-0,8	3,06	0,069	0		0,225	0	0
Насадка діаметром 18 мм								
1	-0,3	2,88	0,069	8,78	11,08	0,12	0,79	10,7
2	-0,3	2,88	0,069	8,75		0,12	0,78	10,6
3	-0,3	2,88	0,069	8,73		0,12	0,78	10,6
4	-0,3	2,88	0,069	8,65		0,12	0,78	10,6
5	-0,35	2,88	0,069	8,15		0,14	0,73	11,8
6	-0,4	2,88	0,069	7,87		0,15	0,71	12,5
7	-0,4	2,82	0,069	7,14		0,16	0,64	12,1
8	-0,55	2,82	0,069	6,04		0,21	0,54	14,3
9	-0,6	2,82	0,069	5,47		0,23	0,49	14,6
10	-0,8	2,82	0,069	2,76		0,3	0,24	10,2
11	-0,9	2,76	0,069	0		0,34	0	0
Насадка діаметром 23 мм								
1	-0,3	2,37	0,15	8,2	15,12	0,168	0,54	10,9
2	-0,3	2,34	0,15	8,09		0,17	0,53	10,8
3	-0,3	2,34	0,15	7,95		0,17	0,52	10,6
4	-0,35	2,34	0,15	7,83		0,185	0,51	11,5
5	-0,4	2,34	0,15	7,19		0,2	0,47	11,7
6	-0,45	2,34	0,15	6,72		0,215	0,44	12
7	-0,5	2,34	0,15	5,7		0,228	0,37	10,9
8	-0,65	2,34	0,165	5,3		0,272	0,35	13,07
9	-0,9	2,31	0,18	3,23		0,336	0,21	10,6
10	-1	2,28	0,18	0		0,359	0	0
Насадка діаметром 25 мм								
1	-0,3	2,46	0,12	8,06	13,83	0,152	0,58	10,3
2	-0,3	2,46	0,15	7,92		0,163	0,57	11,1
3	-0,3	2,46	0,15	7,73		0,163	0,55	10,7
4	-0,4	2,46	0,15	7,4		0,192	0,53	12,5
5	-0,45	2,46	0,15	6,43		0,206	0,46	11,9
6	-0,5	2,46	0,15	5,5		0,219	0,39	10,9
7	-0,8	2,46	0,15	3,1		0,29	0,22	8,9
8	-1	2,46	0,15	0		0,33	0	0

За результатами досліджень в програмі MS EXEL 2007 побудовані характеристики  $h = f(i)$ ;  $\eta = f(i)$ ;  $\eta = f(d_1)$ ;  $\eta = f(k)$  та отримані рівняння регресії для кожної графічної залежності.

На рис. 3-8 зображено напірні та енергетичні характеристики струминних насосів, побудовані з використанням таблиць 1, 2. Напірні

характеристики струминних насосів (рис. 3, 4) відзначаються оберненою нелінійною залежністю відносного напору  $h$  та коефіцієнта інжекції  $i$  струминного насоса. Енергетичні характеристики струминних насосів (рис. 5, 6) мають екстремальний характер і дають змогу визначити оптимальне значення коефіцієнта інжекції, яке відповідає граничному ККД ежекційної системи. З метою визначення оптимальних кон-

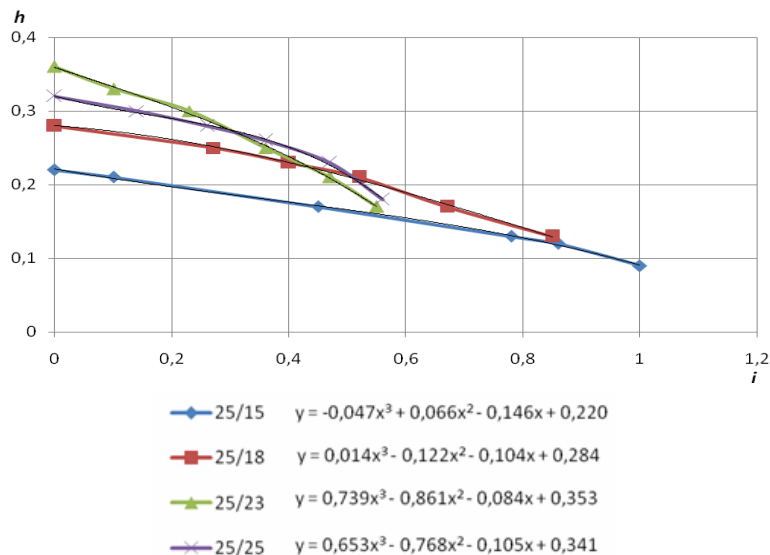


Рисунок 3 – Графічна залежність  $h = f(i)$  при  $l_{max}$

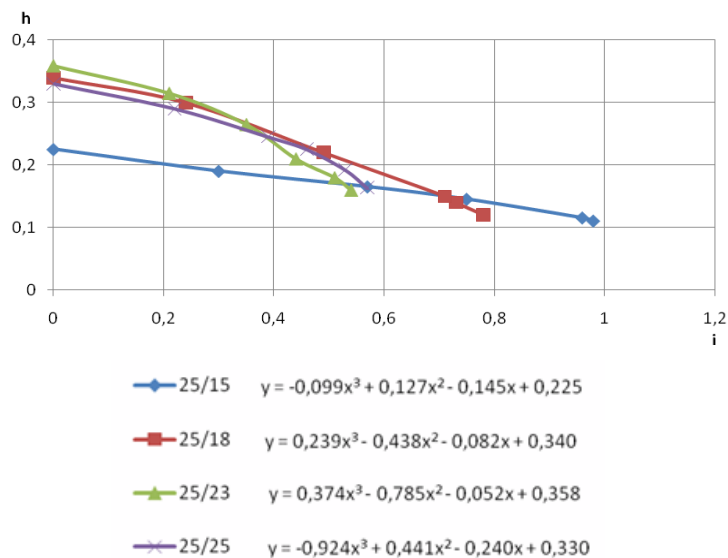


Рисунок 4 – Графічна залежність  $h = f(i)$  при  $l_{min}$

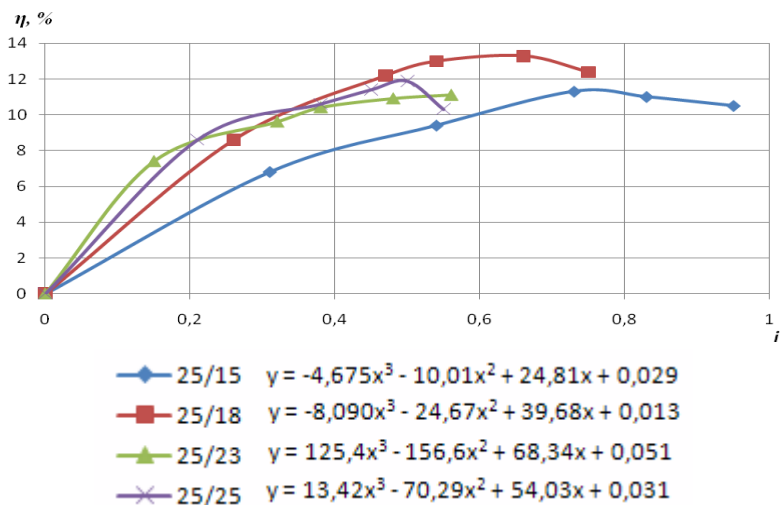


Рисунок 5 – Графічна залежність  $\eta = f(i)$  при  $l_{max}$

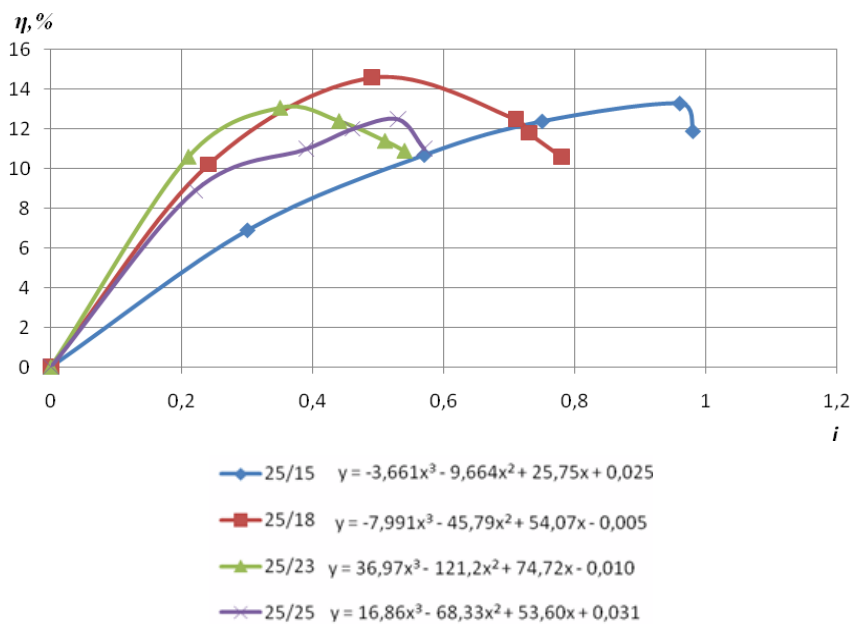


Рисунок 6 – Графічна залежність  $\eta = f(i)$  при  $l_{min}$

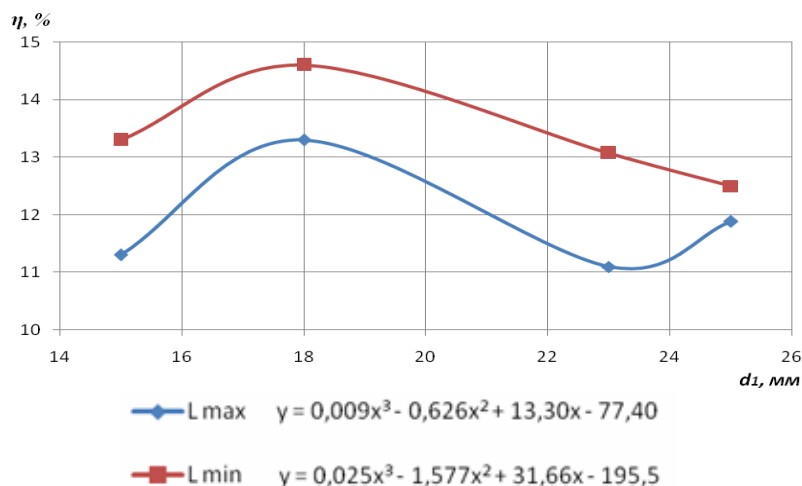


Рисунок 7 – Графічна залежність  $\eta = f(d_1)$  при  $l_{max}$  і  $l_{min}$

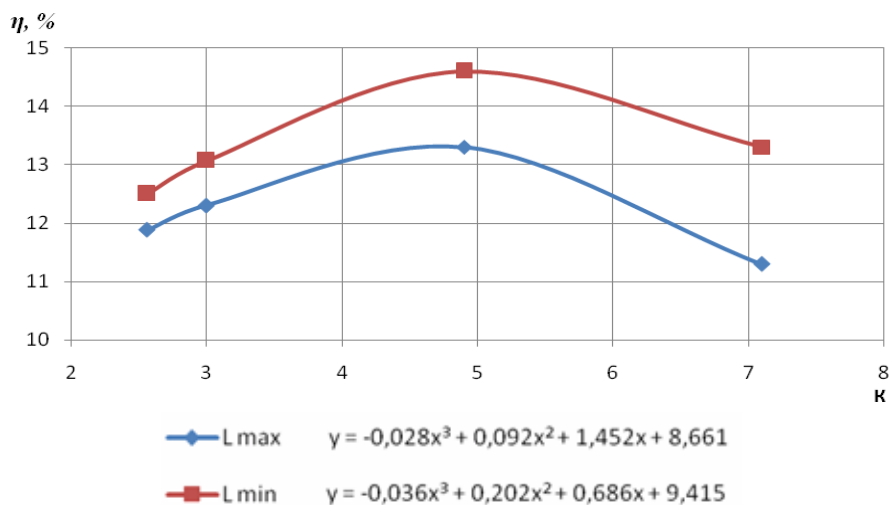


Рисунок 8 – Графічна залежність  $\eta = f(\kappa)$  при  $l_{max}$  і  $l_{min}$



структивних розмірів деталей проточної частини струминного насоса на основі представлених в таблицях 1.2 даних отримано залежності для граничних ККД струминного насоса: за рис. 7 можна визначити оптимальний діаметр робочої насадки струминного насоса, а за рис. 8 – оптимальне співвідношення діаметрів камери змішування та робочої насадки. Наведені на рис. 3-8 залежності представлені у вигляді поліноміальних функцій з відповідними коефіцієнтами.

Врахування отриманих залежностей дає змогу покращити точність прогнозування характеристик свердловинних струминних насосів та підсилити ефективність застосування ежекційних технологій. Завдання подальших досліджень полягає в промисловій перевірці отриманих результатів та розробці рекомендацій, спрямованих на проектування свердловинних ежекційних систем з покращеними енергетичними показниками.

### *Література*

- 1 Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
- 2 Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Лямаев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
- 3 Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач; под редакцией Руднева С.С., Подвидза Л.Г. – М.: Машиностроение, 1974. – 416 с.
- 4 Ландау Д.Д. Гидродинамика / Д.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1988. – 235 с.
- 5 Рабинович Н.Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении / Н.Р. Рабинович. – М.: Недра, 1989. – 270 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
07.02.11  
Рекомендована до друку професором  
Б.В. Конесм*