
Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 622.24 + 621.694.2

DOI: 10.31471/1993-9868-2022-2(38)-76-84

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ СВЕРДЛОВИННОГО СТРУМИННОГО НАСОСА

Д. О. Паневник

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101;
e-mail: den.panevnik@gmail.com

Проаналізовано основні схеми створення циркуляційних течій в проточній частині струминного насоса з використанням лопаткових, гвинтових та тангенціальних направляючих елементів, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність експлуатації свердловинних ежекційних систем. Створення циркуляційних течій в проточній частині струминного насоса дає змогу зменшити втрати енергії при змішуванні потоків та збільшити напір, створюваний ежекційною системою. Встановлено, що до складу ежекційних систем входять місцеві та лінійні гідравлічні опори у вигляді дроселюючих елементів, промивальних насадок долота та напірної лінії струминного насоса. Показано, що в сучасних конструкціях свердловинних ежекційних систем доцільно застосовувати дві основні схеми створення циркуляційних течій: закручування робочого та інжектваного потоків. Розроблена методика вибору схеми закручування потоку в проточній частині струминного насоса для сучасних свердловинних ежекційних систем із врахуванням конструкції зосереджених та лінійних опорів у гідравлічних каналах робочого та інжектваного потоків. Закручування робочого потоку доцільно використовувати в конструкціях всмоктувальних та нагнітально-всмоктувальних пристроїв для буріння та в накерних і двотрубних пристроях для нафтовидобутку. Закручування інжектваного потоку може бути рекомендовано до використання в конструкціях нагнітальних та нагнітально-всмоктувальних пристроїв для буріння та комбінованій насосній установці для нафтовидобутку. Вихрові наддолотні струминні насоси нагнітального та всмоктувального типу дають змогу зменшити собівартість буріння свердловин. Використання вихрових ежекційних систем нагнітально-всмоктувального типу сприяє зростанню продуктивності свердловин. Закручування потоку в проточній частині нафтопромислових струминних насосів дозволяє підвищити нафтовидобуток та зменшити виробничу собівартість валової продукції.

Ключові слова: свердловинна ежекційна система, вихровий струминний насос, закручування змішуваних потоків, енергетична ефективність.

The main schemes of creating circulating flows in the flowing part of the jet pump with the use of a vane, screw and tangential guide elements, which increase the energy efficiency of downhole ejection systems. The creation of circulating currents in the jet pump flowing part makes it possible to reduce energy losses during the mixing of flows and increase the pressure created by the ejection system. It is established that the composition of ejection systems includes local and linear hydraulic supports in the form of throttle elements, flushing nozzles, and the jet pump pressure line. It is shown that in modern designs of well ejection systems, it is expedient to use two main schemes for creating circulation flows: swirling of working and injected flows. A method for selecting the flow swirling scheme in the jet pump flow part for modern well ejection systems is developed, taking into account the design of concentrated and linear resistances in the hydraulic channels of the working and injected flow. It is

expedient to use swirling of a working stream in designs of suction and injection-suction devices for drilling and in packer and two-pipe devices for oil production. Swirling the injected flow can be recommended for use in the design of injection and suction devices for drilling and combined pumping units for oil production. Vortex above-bit jet pumps of injection and suction type help to reduce the well drilling cost. The use of vortex injection systems of the injection-suction type contributes to the growth of well productivity. Flow swirling in the flowing part of oilfield jet pumps helps to increase oil production and reduce the production cost of gross output.

Key words: well ejection system, vortex jet pump, swirling of mixed streams, energy efficiency.

Вступ

Конструкція струминного насоса розроблена Д. Томпсоном (1852 р.) та Г. Гіфардом (1858 р.), а в 1859 році вперше використана Ж.Б. Вентурі для осушування боліт у Північній Італії (м. Модена). Теоретичні основи робочого процесу струминного апарата запропоновані Д. Бернуллі (1738 р.), Г. Цейнером (1863 р.) та М. Ренкіним (1870 р.). Вперше нафтовий свердловинний струминний насос був використаний у 1875 році людиною на ім'я Фосет [1], приводився в дію парою і вимагав значного діаметра стовбура свердловини, внаслідок чого не знайшов широкого комерційного використання. В тридцятих роках минулого століття в Німеччині була випробувана установка для відбору рідин із глибоких свердловин [2] у складі декількох послідовно з'єднаних малонапірних струминних насосів. В середині минулого століття Гослін І. і Браун М. (Каліфорнійський університет) [3] та Каннінгем Р.Г. (Пенсільванський університет) [4] доповнили теоретичні розробки Г. Цейнера та М. Ренкіна емпіричними залежностями та визначили умови експлуатації струминного насоса в кавітаційному режимі. В другій половині минулого століття струминні насоси почали використовувати для підвищення ефективності відбору керна [5] та зниження тиску на вибої [6] у процесі буріння. Французький інститут нафти вперше визначив характеристики долотних струминних насосів [7].

Основним недоліком ежекційних систем є низька енергетична ефективність струминного насоса, коефіцієнт корисної дії якого не перевищує 50 % [8]. Значні гідравлічні втрати при змішуванні потоків обмежують поширення та подальший розвиток нафтогазових ежекційних технологій. Тому, з огляду на необхідність підвищення енергоефективності ежекційних систем, удосконалення конструкції свердловинного струминного насоса залишається актуальною задачею.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Конструкцію струминного насоса зазвичай удосконалюють шляхом підбору оптимальних

співвідношень: площі камери змішування та робочої насадки [9], відстані між камерою змішування та робочою насадкою, довжин камери відновлення швидкостей [10], кута розкриття дифузора [11], кута підведення інжектваного потоку [12]. Залежність згаданих параметрів від коефіцієнта корисної дії струминного насоса має екстремальний характер, що дозволяє, залежно від призначення ежекційної системи, прийняти необхідний критерій оптимізації її конструкції. Оптимізація взаємної орієнтації робочого та інжектваного потоків дозволяє зменшити втрати енергії в камері змішування струминного насоса в 39 – 242 рази (залежно від величини основного геометричного параметра струминного насоса) [13]. За даними експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання з метою зменшення втрат енергії при змішуванні потоків величину кута з'єднання робочого та інжектваного потоків рекомендовано приймати в діапазоні від 0 до 15°. Додатковий вплив на енергетичну ефективність використання нафтогазових ежекційних систем має схема розміщення струминного насоса в свердловині. Глибина розміщення струминного насоса в свердловині має обернений вплив на величину коефіцієнта інжекції та коефіцієнт корисної дії [14]. Встановлюючи струминний насос на оптимальну глибину, можна збільшити його ККД на 30 %. Суттєвий вплив на параметри експлуатації свердловинного струминного насоса має характер гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи. Залежно від конструктивного виконання сучасні конструкції наддолотних ежекційних систем можна поділити на три групи: всмоктувальні [15], нагнітальні [16] та нагнітально-всмоктувальні [17]. Згадані типи ежекційних систем дозволяють здійснювати відповідно зворотне місцеве промивання вибою, інтенсифікувати очищення від вибуреної породи привибійної зони та знижувати диференційний тиск в свердловині.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Досвід промислового використання свердловинних ежекційних систем показує, що удо-

сконалення конструкції струминного насоса шляхом оптимізації геометричних розмірів його проточної частини сьогодні практично вичерпало свій потенціал. Одним із шляхів підвищення енергетичної ефективності експлуатації свердловинних ежекційних систем є закручування змішуваних потоків [18] за допомогою розміщених в проточній частині струминного насоса направляючих елементів. Створення циркуляційних течій в проточній частині струминного насоса дозволяє зменшити втрати енергії при змішуванні робочого та інжектваного потоків, збільшити напір і величину коефіцієнта інжекції свердловинної ежекційної системи [19]. Зважаючи на значний обсяг існуючих на сьогодні конструкцій ежекційних систем та схем їх застосування, доцільно визначити методику вибору схеми закручування потоку в проточній частині струминного насоса. При цьому необхідно враховувати наявність зосереджених та лінійних опорів в гідравлічних каналах робочого та інжектваного потоків в ежекційних системах різних конструкцій та призначення. Методика вибору схеми закручування потоку в проточній частині струминного насоса повинна узгоджуватись з існуючими принципами проєктування свердловинних ежекційних систем.

В процесі проєктування свердловинних струминних насосів доцільно обґрунтувати перелік техніко-економічних показників, які визначають доцільність використання ежекційних технологій під час розробки нафтогазових родовищ. В процесі визначення економічної доцільності застосування ежекційних технологій необхідно враховувати функціональне призначення окремих схем включення струминного насоса в гідравлічну систему свердловини та технологічну ефективність їх використання.

Мета та завдання досліджень

Метою досліджень, результати яких представлені в даній роботі, є обґрунтування вибору схеми закручування потоку в свердловинних ежекційних системах із врахуванням сучасних вимог до техніко-економічної ефективності їх застосування.

Поставлена мета передбачає:

- аналіз можливості підвищення ефективності використання свердловинних ежекційних систем шляхом застосування технологій закручування потоку в проточній частині струминного насоса;

- обґрунтування вибору схеми закручування потоку в сучасних свердловинних ежекційних системах;

- встановлення взаємозв'язку між функціональним призначенням та технологічною і техніко-економічною ефективністю окремих типів вихрових ежекційних систем.

Алгоритм реалізації поставлених завдань досліджень передбачає аналіз основних схем створення циркуляційних течій в проточній частині струминного насоса, оцінку впливу режиму руху рідини в елементах ежекційної системи на ефективність закручування змішуваних потоків, систематизацію типів гідравлічних опорів в окремих конструкціях свердловинних ежекційних систем та встановлення особливостей їх застосування у складі наддолотної компоновки.

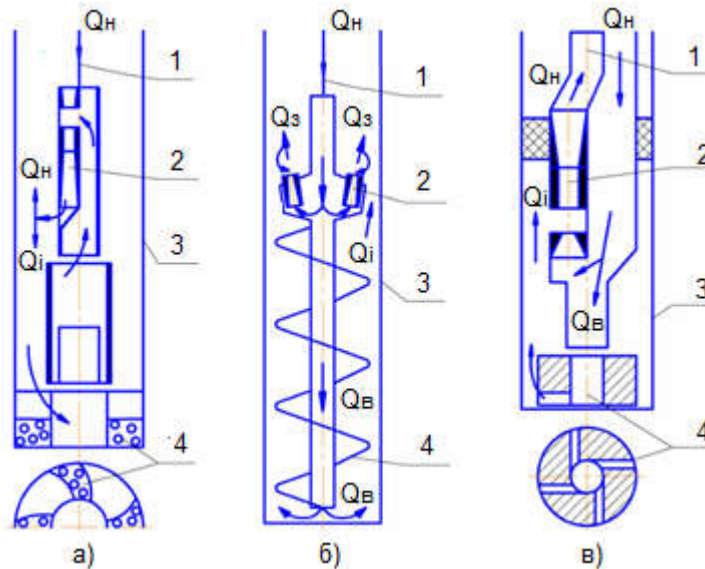
Висвітлення основного матеріалу дослідження

В сучасних конструкціях свердловинних ежекційних систем можуть бути реалізовані дві основні схеми створення циркуляційних течій в проточній частині струминного насоса: закручування робочого та закручування інжектваного потоку. Одночасне закручування робочого та інжектваного потоку не знайшло використання через значне ускладнення конструкції ежекційної системи. Для закручування потоку зазвичай застосовуються лопаткові (рис. 1 а), гвинтові (рис. 1 б) та тангенціальні (рис. 1 в) направляючі елементи.

Вибір раціональної схеми закручування потоку в свердловинних струминних насосах визначається конструкцією ежекційної системи та режимом руху рідини в її елементах.

Режим руху рідини в елементах ежекційної системи і величина числа Рейнольдса R_e є визначальним фактором у виборі схеми закручування потоку. Експериментальними дослідженнями встановлено, що максимальна ефективність закручування потоку відповідає малим значенням числа Рейнольдса, величина яких не перевищує 10^4 .

Під час експлуатації ежекційних систем для буріння такий режим може бути реалізований з використанням пристроїв, що складаються з декількох паралельно під'єднаних струминних насосів. Зокрема, паралельне з'єднання струминних насосів використовується в конструкціях ежекційних систем всмоктувального, нагнітального та нагнітально-всмоктувального типів. При застосуванні пакерних і двотрубних ежекційних систем для нафтовилучення найбільш ефективний режим закручування може бути реалізований при видобуванні високов'язких нафт. Під час використання комбінованих ежекційних систем діапазон зміни про-



а – наддолотний насос для зворотного промивання вибою;
 б – наддолотний насос для комбінованого промивання вибою; в – пакерний нафтовий насос;
 1 – колона труб; 2 – струминний насос; 3 – свердловина; 4 – елемент для закручування потоку;
 Q_n – продуктивність бурового насоса; Q_v – витрата на вибої;
 Q_i, Q_z – витрата інжектваного та змішаного потоку

Рисунок 1 – Компонувки свердловинних вихрових ежекційних систем

дуктивності зануреного силового привода дає змогу забезпечити оптимальний режим руху нафтогазового потоку в робочій насадці струминного насоса. Закручування потоку може застосовуватись для всіх відомих схем ежекційних систем, які використовують при нафтовидобуванні: двотрубних, пакерних та комбінованих із зануреним силовим приводом у вигляді відцентрового або штангового [20] насосів.

Наявність елементів для закручування потоку створює додатковий гідравлічний опір в лініях, що з'єднують струминний насос з циркуляційною системою свердловини. Гідравлічні втрати, викликані наявністю елементів для закручування потоку, додаються до вже існуючих втрат у даній гідравлічній лінії. Отже, елементи для закручування потоку треба встановлювати в гідравлічних лініях, які містять мінімальну кількість місцевих гідравлічних опорів.

В таблиці 1 прийнято такі позначення: $D_p, D, D_{пл}, D_n$ – гідравлічні опори, утворені відповідно дроселюючими елементами, насадками долота, порами пласта та напірною лінією струминного насоса.

Визначення місця встановлення елементів для закручування потоку, отже, вимагає попереднього аналізу конструкцій свердловинних ежекційних систем. Завдяки аналізу конструкцій струминних насосів встановлено типи та місця зосередження гідравлічних опорів для найбільш поширених ежекційних систем, які

використовують під час буріння та експлуатації свердловин (таблиця 1).

Таблиця 1 – Наявність гідравлічних опорів в окремих типах свердловинних ежекційних систем

Тип ежекційної системи	Всмоктувальна лінія	Нагнітальна лінія
Всмоктувальна	D_p, D	–
Нагнітальна	–	D
Нагнітально-всмоктувальна	–	–
Пакерна	$D_{пл}$	D_n
Двотрубна	$D_{пл}$	D_n
Комбінована	–	D_n

Конструкції ежекційних систем та вибір схеми закручування потоку наведені на рисунку 2.

В процесі обґрунтування схеми закручування потоку враховуємо, що ежекційні системи для буріння містять замкнений контур привибійної циркуляції промивальної рідини, до складу якого входять дроселюючі елементи D_p та насадки промивальної системи долота D . Наявність напірної лінії у вигляді гідравлічного каналу затрубного простору для систем із замкненим контуром циркуляції не впливає на режим роботи струминного насоса.

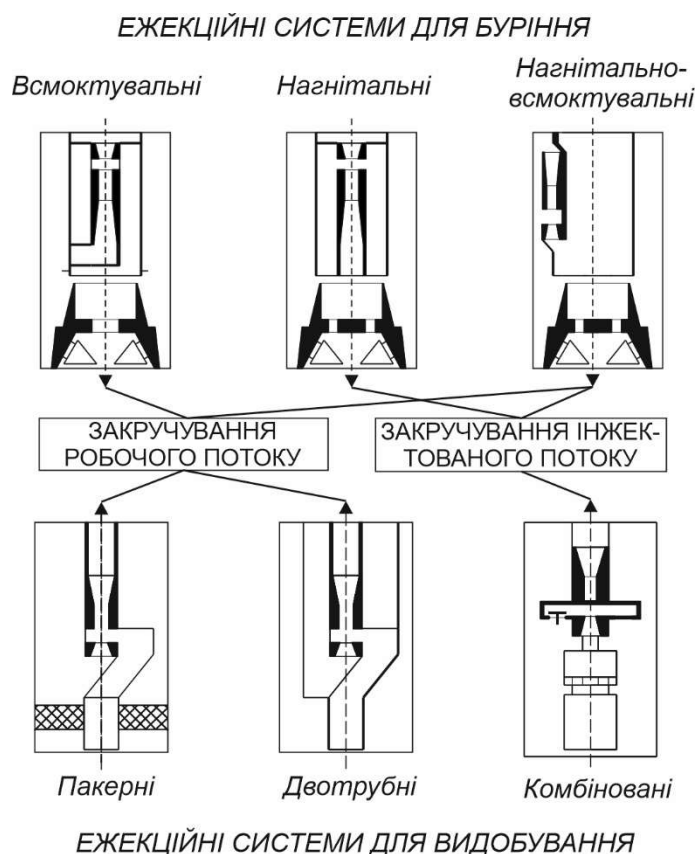


Рисунок 2 – Вибір схеми закручування потоку в свердловинних ежекційних системах

Таблиця 2 – Переваги застосування ежекційних систем для буріння

Тип ежекційної системи	Функціональне призначення	Технологічна ефективність	Техніко-економічна ефективність
Нагнітальна	Зростання витрати на вибої	Зростання стійкості долота	Зменшення собівартості буріння свердловини
Всмоктувальна	Зниження тиску на вибої	Зростання механічної швидкості буріння	
Нагнітально-всмоктувальна		Зростання стійкості долота	Зростання продуктивності свердловини
		Збереження проникності колектора	

На відміну від систем із замкненим привибійним контуром, циркуляції режим роботи ежекційного обладнання, яке використовують для видобування нафти, залежить від гідравлічних втрат в напірній лінії струминного насоса D_n (виконаної, зазвичай, у вигляді гідравлічного каналу НКТ) та у продуктивному горизонті $D_{пл}$. Особливістю конструкції комбінованої ежекційної системи є підсмоктування інжектваної рідини із зменшеною (через присутність розчиненого газу) густиною. В граничному випадку підсмоктується виключно газова фаза інжектваного середовища. Враховуючи, що густина потоку безпосередньо впливає на вели-

чину втрат енергії в гідравлічних опорах для даного типу ежекційної системи, можна рекомендувати закручування інжектваного потоку.

З метою визначення техніко-економічних переваг застосування окремих схем закручування потоків в конструкціях наддолотних струминних насосів розглянемо взаємозв'язок між функціональним призначенням та технологічною і техніко-економічною ефективністю ежекційних систем призначених для буріння експлуатаційних свердловин (табл. 2).

Особливістю застосування ежекційної системи нагнітального типу є можливість збільшення витрати на вибої свердловини порівняно з продуктивністю бурового насоса. Витрата на

вибої Q_v для даного типу ежекційної системи визначається за формулою

$$Q_v = Q_n(1+i), \quad (1)$$

де Q_n – продуктивність бурового насоса;

i – коефіцієнт інжекції струминного насоса (співвідношення витрат інжектваного Q_i та робочого Q_n потоків), $i = Q_i/Q_n$.

Інтенсифікація промивання вибою дає змогу підвищити якість очищення привибійної зони, внаслідок чого зростають механічна швидкість буріння та стійкість долота. Механічна швидкість буріння є показником темпів спорудження свердловин, оскільки механічне буріння займає до 40 % [21] часу в структурі необхідних видів робіт. Зростання витрати на вибої, таким чином, сприяє скороченню тривалості виробничого циклу, що, у свою чергу, дозволяє підвищити продуктивність праці та зменшити величину витрат, які формують собівартість бурових робіт, безпосередньо через зниження заробітної плати [21]. Крім того, зростання стійкості долота дозволяє зменшити витрати на бурові роботи шляхом економії матеріальних ресурсів.

Всмоктувальна та нагнітально-всмоктувальна ежекційні системи викликають зниження тиску у при вибійній зоні свердловини, внаслідок чого зростає механічна швидкість буріння та стійкість долота. Відомий також вплив величини протитиску на пласт та тривалості контакту промивальної рідини з породою на зміну її фільтраційних властивостей. Враховуючи загальноприйнятну форму запису рівняння для визначення відносного напору h струминного насоса, величина тиску P_i у привибійній зоні може бути визначена за формулою

$$P_i = \frac{P_3 - P_p h}{1 - h}, \quad (2)$$

де P_3 , P_p – значення тисків змішаного та робочого потоків.

При виборі схеми закручування враховуємо, що для всмоктувальних систем доцільне закручування робочого, а для нагнітально-всмоктувальних – робочого чи інжектваного потоку (рис. 2). Тривалість первинного розкриття продуктивного горизонту і репресії на пласт впливає на радіус поширення фільтрату в породу і її проникність, яка є одним з природно-геологічних факторів розробки нафтових родовищ, що норми доходу в процесі оцінки ефективності та інвестиційної та інноваційної [22] діяльності.

Зміна технологічних показників буріння при застосуванні вихрових струминних насосів може бути розрахована за наближеними емпіричними формулами, які встановлюють взаємозв'язок між механічною швидкістю буріння, стійкістю долота, диференціальним тиском у свердловині та витратою промивальної рідини на вибої [23].

Зважаючи на більше значення ККД, застосування вихрових струминних насосів дозволяє зменшити витрату енергії, спрямовану на забезпечення видобутку нафти. Зокрема, зростає співвідношення об'ємів вилученої та закачуваної нафти, тобто коефіцієнт інжекції струминного апарата. Таким чином, закручування потоку в проточній частині струминного апарата дозволяє зменшити виробничу собівартість валової продукції.

Відповідно до розроблених автором рекомендацій стосовно вибору схеми закручування потоку в пакерних та двотрубних ежекційних системах направляючі елементи доцільно розташовувати в робочому потоці. За даними проведених експериментальних досліджень закручування робочого потоку дає змогу підвищити коефіцієнт інжекції на 31,6 % і ККД струминного насоса – на 9,89 %. В комбінованих системах доцільно застосовувати закручування інжектваного потоку. Коефіцієнт інжекції та ККД струминного насоса при цьому зростають відповідно на 19,12 % та 26,14 %.

Висновки

Проведеними дослідженнями доведено можливість підвищення ефективності використання свердловинних ежекційних систем шляхом застосування технологій закручування потоку в проточній частині струминного насоса.

На основі встановлення типів та місць зосередження гідравлічних опорів обґрунтовано вибір схеми закручування потоку в сучасних свердловинних ежекційних системах:

- закручування робочого потоку доцільне в конструкціях всмоктувальних та нагнітально-всмоктувальних пристроїв для буріння та в пакерних і двотрубних пристроях для нафтовидобування;

- закручування інжектваного потоку доцільне в конструкціях нагнітальних та нагнітально-всмоктувальних пристроїв для буріння та в комбінованій насосній установці для нафтовидобування.

У ході дослідження взаємозв'язку між функціональним призначенням та технологічною і техніко-економічною ефективністю окремих типів вихрових ежекційних систем встановле-

но, що пристрої нагнітального та всмоктувального типу забезпечують зниження собівартості буріння свердловини, а пристрої нагнітально-всмоктувального типу сприяють зростанню продуктивності свердловин. Закручування потоку в проточній частині нафтопромислових струминних насосів дозволяє підвищити нафтовидобуток та зменшити виробничу собівартість валової продукції.

Завдання подальших досліджень полягає у розробленні алгоритму автоматизованого проектування елементів конструкції вихрових свердловинних ежекційних систем.

Література

1. Shoukry A., Pugh T. Weatherford Artificial Lift Systems. Weatherford International. 2011. 24 p. www.summitdownloadportal.com/logos/1290602355.
2. Казак А.С., Росин И.И., Чичеров И.Г. Погружные безштанговые насосы в добыче нефти. Москва: Недра, 1978. 232 с.
3. Gosline J., O'Brien M. The waterjet pump. *University of California Publications in Engineering*. 1934. Vol. 3. No 3. P. 167–190.
4. Cunningham R.G., Riser W. Jet-pump theory and performance with fluid of high viscosity. *Transactions ASME*. 1957. Vol. 79. P. 1807–1820.
5. Дерусов В.П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин. М.: Недра, 1984. 184 с.
6. Zhu H. Y., Liu Q.Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica (Transactions B: Mechanical Engineering)*. 2015. No 22(3). P. 792–803.
7. Cholet H., Grausse R. Improved hydraulics for rock bits. Proceeding of Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Houston, USA, October 1-3 1978. SPE 7516. 8 p.
8. Аникин Б.Н. О коэффициенте пологого действия эжекторного насоса. *Гидротранспорт и судовые системы*: сб. научн. тр. Калининград, 1989. С. 15–21.
9. Velez R.P., Vásquez-Santacruz J., Marín-Urías L., Vargas A., García-Ramírez P., Morales-de-la-Mora J., Vite-Morales A., Gutierrez-Domínguez E. Efficiency Maximization of a Jet Pump for an Hydraulic Artificial Lift System. *Scipedia*. 2019. Vol. 35. No 1. 12 p. <https://doi.10.23967/j.rimni.2018.11.002>.
10. Yapic R., Aldas K. Optimization of water jet pumps using numerical simulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*. 2013. Vol. 227. No 4. P. 438–449. <https://doi.org/10.1177/0957650913487529>.
11. Xu K., Wang G., Wang L., Yun F., Sun W., Wang X., Chen, X. Parameter Analysis and Optimization of Annular Jet Pump Based on Kriging Model. *Applied Sciences*, 2020. Vol. 10. No 21. 16 p. <https://doi.org/10.3390/app10217860>.
12. Xu K., Wang G., Zhang L., Wang L., Yun F., Sun W., Wang X., Chen X. Multi-Objective Optimization of Jet Pump Based on RBF Neural Network Model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. No. 236. 18 p. <https://doi.org/10.3390/jmse9020236>.
13. Паневник Д.О. Повышение энергетической эффективности использования нефтяных струйных насосов. *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65. № 2. С. 181–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-1-92>.
14. Паневник Д.А., Паневник А.В. Повышение энергоэффективности использования скважинных струйных насосов. *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63. № 5. С. 462–471.
15. Zhu H. Y., Liu Q.Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibroengineering*. 2014. No 8. P. 2224–2249.
16. Suryanarayana P. V., Hasan K., Hughes W.I. Technical Feasibility and Applicability of a concentric jet pump in underbalanced drilling: proceeding of the SPE/IADS Underbalanced Technology Conference and Exhibition, Houston, USA, 11-12 October 2004. SPE/IADS 91595. 20 p.
17. Chen X., Gao D., Guo B. A method for optimizing jet-mill-bit hydraulics in horizontal drilling. *SPE Journal*. 2016. No 4. SPE 178436. P. 416–422.
18. Паневник Д.О. Аналіз досліджень впливу закручування потоку на характеристику свердловинних струминних насосів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 4(77). С.31-40. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4\(77\)-31-40](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4(77)-31-40).
19. Panevnyk D.A. Study on characteristics of a downhole vortex jet pump. *Romanian Journal of Petroleum & Gas Technology*. 2021. VOL. II (LXXIII). No. 2. 10 p. <https://doi.org/10.51865/JPGT.2021.02.03>.
20. Shen J., Wu X., Wang J. Application of composite jet-rod pumping system in a deep heavy-oil field in Tarim China: proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence (Italy), 19-22 September 2010. SPE 134068. 8 p.

21. Витвицький Я.С., Андрійчук І.В., Лесюк О.І., Витвицька І.Я., Чарковський В.М. Організація і планування операційної діяльності нафтових підприємств. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. 364 с.

22. Економіка нафтогазових підприємств / Витвицький Я.С., Витвицька У.Я., Метошоп І.М., Кузьмін В.М. та ін.; за ред. Я.С. Витвицького та М.О. Данилюка. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2013. 604 с.

23. Мислюк М.А., Рибчич І.Й., Яремійчук Р.С. Буріння свердловин. У 5 т. Том 1 -Загальні відомості. Бурові установки. Обладнання та інструмент. К.: ІнтерпресЛТД, 2002. 367 с.

References

1. Shoukry A., Pugh T. Weatherford Artificial Lift Systems. Weatherford International. 2011. 24 p. www.summitdownloadportal.com./logos/1290602355.

2. Kazak A.S., Rosin I.I., Chicherov I.G. Pogruzchnye bezshtangovyye nasosy v doboche nefli. Moskva: Nedra, 1978. 232 p. [in Russian]

3. Gosline J., O'Brien M. The water jet pump. *University of California Publications in Engineering*. 1934. Vol. 3. No 3. P. 167–190.

4. Cunningham R.G., Riser W. Jet-pump theory and performance with fluidofhi viscosity. *Transactions ASME*. 1957. Vol. 79. P. 1807-1820.

5. Derusov V.P. Obratnaya promyvka pri buranii geologorazvedochnykh skvazhin. M.: Nedra, 1984. 184 p. [in Russian]

6. Zhu H. Y., Liu Q.Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica (Transactions B: Mechanical Engineering)*. 2015. No 22(3). P. 792–803.

7. Cholet H., Grausse R. Improved hydraulics for rock bits. Proceeding of Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Houston, USA, October 1-3 1978. SPE 7516. 8 p.

8. Anikin B.N. O koeffitsiente polenogo deystviya ezhektornogo nasosa. *Gidrotransport i sudove sistemy*. Kaliningrad, 1989. P. 15–21. [in Russian]

9. Velez R.P., Vásquez-Santacruz J., Marín-Urías L., Vargas A., García-Ramírez P., Morales-de-la-Mora J., Vite-Morales A., Gutierrez-Domínguez E. Efficiency Maximization of a Jet Pump for an Hydraulic Artificial Lift System. *Scipedia*. 2019. Vol. 35. No 1. 12 p. <https://doi.10.23967/j.rimni.2018.11.002>.

10. Yarıç R., Aldas K. Optimization of water jet pumps using numerical simulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A:

Journal of Power and Energy. 2013. Vol. 227. No 4. P. 438–449. <https://doi.org/10.1177/0957650913487529>.

11. Xu K., Wang G., Wang L., Yun F., Sun W., Wang X., Chen, X. Parameter Analysis and Optimization of Annular Jet Pump Based on Kriging Model. *Applied Sciences*, 2020. Vol. 10. No 21. 16 p. <https://doi.org/10.3390/app10217860>.

12. Xu K., Wang G., Zhang L., Wang L., Yun F., Sun W., Wang X., Chen X. Multi-Objective Optimization of Jet Pump Based on RBF Neural Network Model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. No. 236. 18 p. <https://doi.org/10.3390/jmse9020236>.

13. Panevnik D.O. Povyishenie energeticheskoy effektivnosti ispolzovaniya neftyanykh struynykh nasosov. *Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. ob'edineniy SNG*. 2022. Vol. 65. No 2. P. 181–192. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-1-92>. [in Russian]

14. Panevnik D.A., Panevnik A.V. Povyishe- nie energoeffektivnosti ispolzovaniya skvazhin- nykh struynykh nasosov. *Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. ob'edineniy SNG*. 2020. Vol. 63. No 5. P. 462–471. [in Russian]

15. Zhu H. Y., Liu Q.Y., Wang T. Reducing the bottom-hole differential pressure by vortex and hydraulic jet methods. *Journal of Vibroengineering*. 2014. No 8. P. 2224–2249.

16. Suryanarayana P. V., Hasan K., Hughes W.I. Technical Feasibility and Applicability of a concentric jet pump in underbalanced drilling: proceeding of the SPE/IADS Underbalanced Technology Conference and Exhibition, Houston, USA, 11-12 october 2004. SPE/IADS 91595. 20 p.

17. Chen X., Gao D., Guo B. A method for optimizing jet-mill-bit hydraulics in horizontal drilling. *SPE Journal*. 2016. № 4. SPE 178436. P. 416–422.

18. Panevnyk D.O. Analiz doslidzhen vplyvu zakruchuvannia potoku na kharakterystyku sverd- lovynnykh strumynnykh nasosiv. *Rozvidka ta roz- robka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2020. No 4(77). P. 31-40. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4\(77\)-31-40](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4(77)-31-40). [in Ukrainian]

19. Panevnyk D.A. Study on characteristics of a downhole vortex jet pump. *Romanian Journal of Petroleum & Gas Technology*. 2021. Vol. II (LXXIII). No. 2. 10 p. <https://doi.org/10.51865/JPGT.2021.02.03>.

20. Shen J., Wu X., Wang J. Application of composite jet-rod pumping system in a deep heavy-oil field in Tarim China: proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence (Italy), 19-22 September 2010. SPE 134068. 8 p.

21. Vytvytskyi Ya.S., Andriichuk I.V., Lesiuk O.I., Vytvytska I.Ia., Charkovskyi V.M. Orhanizatsiia i planuvannia operatsiinoi diialnosti naftovykh pidpriemstv. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. 2009. 364 p. [in Ukrainian]

22. Ekonomika naftohazovykh pidpriemstv / Vytvytskyi Ya.S., Vytvytska U.Ia., Metoshop I.M., Kuzmin V.M. and oth; za red. Ya.S. Vytvytskoho ta M.O. Danyliuka. Ivano-Frankivsk: Symfoniia forte, 2013. 604 p. [in Ukrainian]

23. Mysliuk M.A., Rybchych I.I., Yarmiichuk R.S. Burinnia sverdlovyn. U 5 t. Tom 1: Zahalnydomosti. Burovi ustanovky. Obladnannia ta instrument.K.: InterpresLTD, 2002. 367 p. [in Ukrainian]