

УДК 622.24+621.694.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СВЕРДЛОВИННИХ СТРУМИННИХ НАСОСІВ

Паневник О.В., Паневник Д.О.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Встановлено вплив конструктивного виконання струминного насоса, концентрації абразивних частинок в потоці та швидкості і характеру його руху на інтенсивність зношування деталей свердловинної ежекційної системи. Проаналізована типова форма поверхні проточної частини струминного насоса, яка утворюється при гідроабразивному зношуванні елементів ежекційної системи. Визначений вплив руйнування деталей проточної частини струминного насоса на його відносний напір та ККД. Показано, що найбільша інтенсивність зношування деталей струминного насоса має місце при реалізації процесу буріння та промивання свердловин. Приведені основні розрахункові співвідношення, які характеризують процес зношування деталей свердловинного струминного насоса.

Ключові слова: свердловинний струминний насос, ежекційна система, буріння та експлуатація свердловин, зношування елементів насоса.

Постановка проблеми. Упродовж сімдесяти років використання розроблені технології застосування струминних насосів при бурінні [1], експлуатації [2] та ремонті [3] нафтових і газових свердловин. Поширеність використання ежекційних технологій свідчить про їх світове значення. Ефективність використання свердловинних струминних насосів при розробці нафтогазових родовищ обмежується недостатнім вивченням впливу експлуатаційних факторів на робочий процес ежекційних систем. Зокрема, на сьогоднішній день, залишається невизначеною залежність ефективності експлуатації свердловинних струминних насосів від кінематичних параметрів та фізичних властивостей потоків в ежекційній системі. Вивчення досвіду використання ежекційних технологій дозволяє підвищити міжремонтний період експлуатації свердловинних струминних насосів і є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зношування елементів свердловинних струминних насосів має визначальний вплив на величину міжремонтного періоду їх експлуатації. В процесі

експлуатації струминних насосів на нафтовому родовищі Мангала (компанія Cairn India Limited, Південно-Західна Індія), продукція якого містить значну кількість кварцевого піску було встановлено [4] зменшення продуктивності окремих свердловин. В процесі ремонту свердловин виявлені наскрізні промиви робочої насадки та елементів клапана, розміщеного на всмоктувальній лінії пристрою. Зменшення прохідних перерізів проточної частини струминного насоса, внаслідок їх закупорювання елементами ущільнень [5], крім зниження ККД може викликати зростання фактичних швидкостей руху робочого та інжектованого потоку, що зумовлює підвищення інтенсивності зношування деталей ежекційної системи, зростання кількості підземних ремонтів та збільшення собівартості нафтовидобутку. Інтенсивність зношування елементів струминного насоса може зростати у випадку виникнення кавітації [6] у його проточній частині.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Світовий досвід використання свердловинних ежекційних систем свідчить про

відсутність системних досліджень, спрямованих на визначення впливу експлуатаційних факторів на закономірності зношування деталей проточної частини струминного насоса. Недостатня інформація про діапазон зміни експлуатаційних параметрів при використанні свердловинних ежекційних систем ускладнює формування граничних умов необхідних для побудови математичної моделі процесу зношування елементів струминного насоса. Як наслідок, при проектуванні конструкцій свердловинних ежекційних систем підвищується небезпека необґрунтованого вибору матеріалів виготовлення елементів проточної частини струминного насоса, що може негативно вплинути на працездатність та вартість нафтогазопромислового обладнання.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є встановлення характеру зношування деталей проточної частини струминного насоса та визначення діапазону зміни гідродинамічних і фізичних параметрів робочого середовища, які впливають на механізм руйнування елементів ежекційної системи, її напірні та енергетичні характеристики.

Виклад основного матеріалу. В процесі аналізу особливостей гідроабразивного зношування пристрою для промивання ґрунтів виділено чотири характерних ділянки камери змішування гідроелеватора (рис. 1, [7]) з різною інтенсивністю втрати матеріалу. Інтенсивність гідроабразивного зношування упродовж осі камери змішування спочатку зростає, а після досягнення максимальної величини в точці $L/d=0,817$ зменшується. Згаданий характер зношування повторюється для обох досліджених матеріалів камери змішування та викликаний, очевидно, особливостями

робочого процесу струминного апарата. Величина тиску центрального робочого потоку суттєво менша тиску периферичного інжектованого потоку. Внаслідок різниці тисків частинки інжектованого потоку рухаються в напрямку до осі камери змішування, на початковій ділянці якої утворюється вихоровий гвинтовий рух рідини. Частинки твердої фази рухаються за спіралеподібними траєкторіями, кут нахилу площини руху яких до поверхні камери змішування змінюється в діапазоні від 0 до 90° . Значення кутів взаємодії твердих частинок та поверхні камери змішування прямопропорційне різниці тисків робочого та інжектованого потоків. Мінімальний тиск робочого потоку та максимальна величина різниці тисків знаходяться на певній відстані від вхідного перерізу камери змішування. Різниця тисків робочого та інжектованого потоків по довжині камери змішування спочатку зростає, а після досягнення максимальної величини зменшується до мінімального значення.

Вплив вихорової течії на кут атаки частинок абразиву та характер зношування камери змішування підтверджений дослідженням робочого процесу струминного апарата при наявності закрутки потоку [8]. Внаслідок закрутки потоку направляючими елементами зношування поверхонь камери змішування збільшилось удвічі порівняно з використанням прямооточних апаратів.

Значення швидкостей змішуваних потоків в проточній частині струминного насоса відповідають величині витрати робочого Q_p та інжектованого Q_i потоків та зміні площ перерізів гідравлічних каналів. Швидкість робочого потоку є максимальною у порівнянні з швидкостями інжектованого та змішаного потоків (залежність ω на рис. 2б). Ділянка 0-1 відповідає постійному значенню швидкості робочого потоку. На ділянці 1-2 відбувається зменшення площ перерізів робочої насадки та збільшення швидкості руху робочого потоку. Вихідна частина 2-3 робочої насадки характеризується незмінними площею перерізу та величиною швидкості робочого потоку. Після виходу з робочої насадки (точка 3) струмінь робочого потоку звужується, що супроводжується зростанням швидкості робочого потоку, максимальна величина якої відповідає точці 3', після чого зменшується до швидкості змішаного потоку (точка 4). З точки зору збереження характеристик струминного насоса важливою є ділянка 2-3 робочої насадки, величину швидкості для якої необхідно враховувати при визначенні зношування елементів ежекційної системи.

Швидкість інжектованого потоку завжди менша швидкості робочого потоку. На ділянці 0-1 приймальної камери (залежність і на рис. 2 б) швидкість інжектованого потоку є постійною. На ділянці 2-3 відбувається зменшення швидкості інжектованого потоку внаслідок зростання його площі. На ділянці 2-3-4 має місце зростання швидкості інжектованого потоку до величини швидкості змішаного потоку (точка 4). Конечна поверхня приймальної камери, яка межує з вхідним перерізом камери змішування, за-

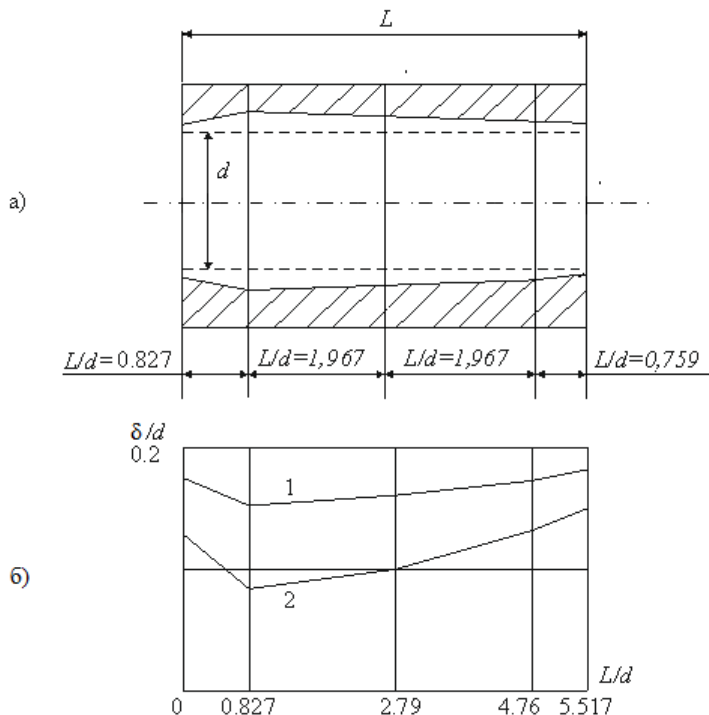


Рис. 1. Схема зношування камери змішування струминного насоса: а) характер гідроабразивного зношування поверхні; б) зміна товщини стінки по довжині камері змішування: 1 – сталь 27 ХГСНДМТЛ; 2 – сталь 35 ХГСЛ

Джерело: [7]

звичай, має кут нахилу 45°, внаслідок чого повинна найбільше піддаватись зношуванню. З точки зору збереження характеристик струминного насоса зношування конічної поверхні приймальної камери, однак, не впливає на параметри експлуатації ежекційної системи. Важливою є ділянка камери змішування, яка безпосередньо взаємодіє з інжектованим потоком.

В точці 4 завершується з'єднання робочого та інжектованого потоків, після чого змішаний потік до вихідного перерізу камери змішування рухається з постійною швидкістю. Швидкість змішаного потоку V_3 обмежена величинами швидкості робочого V_p та інжектованого V_i потоків: $V_p > V_3 > V_i$. В реальних конструкціях струминного насоса швидкість рідини змінюється в діапазоні: для робочої насадки 40-200 м/с; для камери змішування з дифузorzом 10-130 м/с. Зважаючи на значне перевищення швидкості робочого потоку в порівнянні із швидкістю інжектованого потоку робоча насадка струминного насоса піддається більш інтенсивному зношуванню ніж камера змішування з дифузorzом (таблиця 1).

Таблиця 1
Вміст абразивних частинок в проточній частині окремих елементів струминного насоса, %

Технологічний процес	Вміст абразивних частинок	
	Робоча насадка	Камера змішування
Буріння	2,5-4,0	до 15,0
Виклик припливу	0-4,0	$C = f(t)$
Експлуатація	0	0,5-1,0
Промивання	0	до 30%
Утилізація низьконапірного газу	до 1,0	0

Джерело: розроблено авторами

В процесі експлуатаційного буріння вміст піску в буровому розчині, який спрямовується на робочу насадку струминного насоса не перевищує 4%. Після виходу бурового розчину з промивальних насадок долота вміст піску збільшується за рахунок видалення шламів з вибою свердловини. Таким чином, інжектований потік, який надходить в камеру змішування струминного насоса має більший (до 15%) вміст піску порівняно із робочим потоком.

Під час виклику припливу з продуктивного горизонту використовують як воду (з нульовим вмістом піску), так і буровий розчин з концентрацією піску до 4%. Наявність абразивних частинок в інжектованому потоці і камері змішування пов'язана з видаленням з продуктивного горизонту бурового фільтрату, який залишився в породі при первинному розкритті нафтогазоносного пласта. Зважаючи на малу тривалість (від однієї до трьох діб) процесу виклику припливу зношування деталей струминного насоса при реалізації даного технологічного процесу є незначним.

Для створення робочого потоку у видобувних ежекційних системах використовують очищену технічну воду або нафту, а зношування робочої насадки викликане дією гідравлічної ерозії матеріалу. Концентрація піску в продукції нафтових свердловин, зазвичай, знаходиться в межах 0,5-1,0%.

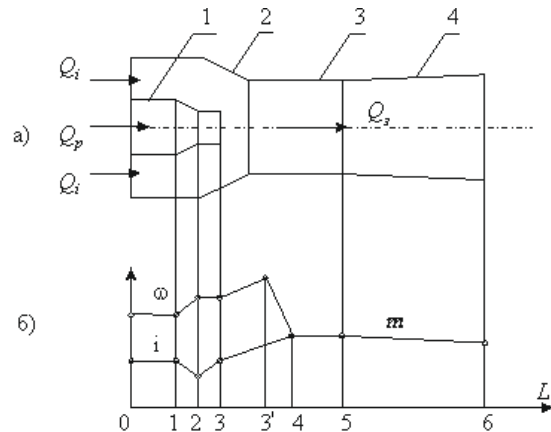


Рис. 2. Зміна швидкості робочого (ω), інжектованого (i) та змішаного (m) потоків: а) схема проточної частини; б) розподіл швидкостей.

1 – робоча насадка; 2 – приймальна камера; 3 – камера змішування; 4 – дифузorz.

Джерело: розроблено авторами

При промиванні свердловин від піскових корків також використовують очищені робочі рідини, а вміст піску (пропанту) в інжектованому потоці доходить до 30%. Даний технологічний процес може викликати найбільше зношування деталей проточної частини свердловинного струминного насоса.

Під час утилізації низьконапірного газу в системах збору та підготовки газу вміст піску в робочому потоці може доходити до 1%.

Характеристики струминного насоса визначаються величиною основного геометричного параметра $K_{сн}$, який розраховується як співвідношення площ перерізів камери змішування та робочої насадки. У випадку переважаючого зношування камери змішування величина $K_{сн}$ буде зростати і робоча точка, яка визначає режим роботи струминного насоса, буде зміщуватись з положення, що характеризує максимальне ККД η_0 (рис. 3а) до положення, що відповідає значенню ККД η_m . Якщо більш інтенсивне зношування відповідає робочій насадці величина основного геометричного параметра зменшується від оптимальної $K_{сн0}$ до значення $K_{сн\omega}$. При цьому ККД струминного насоса змінюється від величини η_0 до значення η_m .

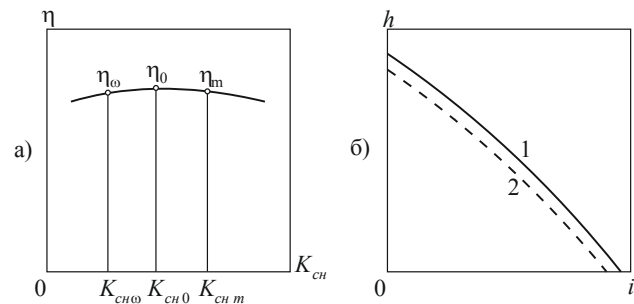


Рис. 3. Зміна ККД (а) та напірної характеристики (б) струминного насоса внаслідок зношування його елементів: 1 – нова проточна частина; 2 – зношена проточна частина.

Джерело: розроблено авторами

Розрахункові співвідношення, які характеризують процес зношування проточної частини струминного насоса

№	Розрахунковий параметр	Розрахункова формула
1	Кінетична енергія частинки абразиву	$E_a = \frac{\pi}{12} \rho_a d_a^3 V_a^2$
2	Частота ударів абразивних частинок	$N = \frac{6}{\pi} C_a \frac{S}{d_a^3} V_a$
3	Інтенсивність зношування від удару однієї частинки	$I_f = k_1 \frac{\pi}{12} \rho_a d_a^3 V_a^2$
4	Інтенсивність зношування від удару N частинок	$I_N = 0,5 k_1 k_2 k_3 \rho_a C_a S V_p^3$
5	Абсолютне зношування поверхонь	$Z = 0,5 k_1 k_2 k_3 \rho_a C_a S V_p^3 T$
6	Питома інтенсивність зношування поверхонь	$I_{num} = 0,5 k_1 k_2 k_3 \rho_a C_a V_p^3$

Джерело: [10]

У випадку нерівномірного зношування елементів струминного насоса в його проточній частині можуть утворюватися додаткові вихорові зони, які сприятимуть розсіюванню енергії та зменшенню напору ежекційної системи (рис. 3б). Вплив процесу зношування елементів струминного насоса на його експлуатаційні характеристики був виявлений ще на ранніх стадіях використання ежекційних систем. В сільськогосподарському підприємстві Азовського району [9] в системі зрошування був встановлений гідроелеватор з витратою 15 л/с та напором 34 м. Через нетривалий час його продуктивність зменшилась вдвічі. Під час демонтажу та ревізії гідроелеватора встановлено зношування його робочої насадки та камери змішування, виготовлених з м'якої сталі.

Проаналізуємо основні розрахункові співвідношення, які характеризують процес зношування поверхонь проточної частини струминного насоса (таблиця 2), використовуючи наступні позначення:

ρ_a – густина матеріалу абразиву;
 d_a – діаметр абразивної частинки;
 V_a, V_p – швидкість руху абразивної частинки та потоку рідини;

C_a – концентрація абразиву в потоці;
 S – площа поверхні, що контактує з гідроабразивним потоком;

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що визначають умови обтікання поверхонь, транспортну здатність потоків, форму абразивних частинок та інші фактори;

T – тривалість контакту гідроабразивного потоку та елементів проточної частини струминного насоса.

Відповідно до приведених в таблиці 2 залежностей значна кількість факторів, які визначають інтенсивність зношування поверхонь проточної частини струминного насоса відзначається стохастичністю процесу і не може бути визначена теоретично. Встановлення характеру зношування елементів струминного насоса, таким чином, вимагає використання емпіричних співвідношень.

Висновки і пропозиції.

1. Гідроабразивне зношування деталей свердловинної ежекційної системи супроводжується нерівномірним руйнуванням його елементів, що пов'язано з особливостями робочого процесу струминного насоса.

2. Максимальний вплив на процес гідроабразивного зношування деталей струминного насоса має швидкість руху рідини та вміст абразивних частинок в потоці. Зважаючи на умови використання струминних насосів найбільш небезпечними з точки зору руйнування матеріалу елементів ежекційної системи є технологічні операції, пов'язані з бурінням свердловин та промиванням піскових корків.

3. Руйнування деталей свердловинної ежекційної системи негативно впливає на напірну та енергетичну характеристику струминного насоса.

Завдання подальших досліджень полягає в розробці комп'ютерної моделі процесу зношування елементів проточної частини свердловинного струминного насоса на основі встановлених факторів впливу на характер руйнування деталей ежекційної системи та визначених умов її використання.

Список літератури:

1. Паневник Д.А. Оценка напряженного состояния корпуса наддольного гидроэлеватора / Д.А. Паневник, А.С. Величкович // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 70-73.
2. Liknes F. Jet pump / Liknes F. – Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013. – 109 p.
3. Syed A.A. Coiled-tubing vacuum removes drilling-induced damage / A.A. Syed, C.H. Jeffrey, F.D. Gino // Oil and Gas Journal. – 2002. – Vol. 100. – no 13. – P. 41-46.
4. Chavan C. Selection and successful application of jet pumps in Mangala Oil Fields: a case study / C. Chavan, M. Iha, M.K. Singh, R. Singh // SPE Artificial Lift Conference and Exhibition, Manama (Bahrain) 27-28 November 2012. – SPE 163116. – 24 p.
5. Mohammed S.K. The Experience of using jet pumps with hydraulic pumping bottom-hole assemblies to reactivate Idle Wells in a heavy oil reservoir in the East Soldado Field / S.K. Mohammed // SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, Port of Spain (Trinidad and Tobago), 13-15 June 2016. – SPE 180799-MS. – 8 p.
6. Yapici R. Optimization of water jet pumps using numerical simulation / R. Yapici, K. Aldas // Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. – 2013. – № 6. – P. 438-449.
7. Марукович Е.И. Литейные сплавы и технологии / Е.И. Марукович, М.И. Карпенко. – Минск: Белоруская наука, 2012. – 442 с.

8. Филиппов С.В. Влияние закрутки сжатого воздуха на величину износа сопла при пневмогидроструйной обработке / С.В. Филиппов // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 2. – С. 243-245.
9. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве / П.Н. Каменев. – М.: Стройиздат, 1970. – 415 с.
10. Доценко А.И. Основы триботехники / А.И. Доценко, И.А. Буяновский. – М.: Инфра – М., 2014. – 321 с.

Паневник А.В., Паневник Д.А.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ИЗНОС ЭЛЕМЕНТОВ СКВАЖИННЫХ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ

Аннотация

Установлено влияние конструктивного исполнения струйного насоса, концентрации абразивных частиц в потоке и скорости его движения на интенсивность изнашивания деталей скважинной эжекционной системы. Проанализирована типичная форма поверхности проточной части струйного насоса, которая образуется при гидроабразивном износе элементов эжекционной системы. Определено влияние разрушения деталей проточной части струйного насоса на его относительный напор и КПД. Показано, что наибольшая интенсивность износа деталей струйного насоса имеет место при реализации процесса бурения и промывки скважин. Приведены основные расчетные соотношения, характеризующие процесс износа деталей скважинного струйного насоса.

Ключевые слова: скважинный струйный насос, эжекционная система, бурение и эксплуатация скважин, износ элементов насоса.

Panevnyk A.V., Panevnyk D.A.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

STUDY OF THE INFLUENCE OPERATIONAL FACTORS ON THE WEAR AND TEAR ITEMS DOWNHOLE JET PUMPS

Summary

Effect of jet pump design, concentration of abrasive particles in the flow and speed of traffic on the wear rate of borehole parts ejection system. We analyzed typical shape of the surface flow jet pump parts, which is formed by hydroabrazive wear ejection system elements. Influence of destruction of parts running parts of the jet pump on pressure and its relative efficiency. Shows that the highest intensity of wear parts jet pump occurs during the process of drilling and washing the wells. Provides basic calculated ratios characterizing borehole jet pump wear parts.

Keywords: borehole Jet pump, ejection-type system, drilling and operation of wells, pump wear and tear items.