

УДК 624.24

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ГВИНТОВИХ ВИБІЙНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ

В. Г. Ясов

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: drill@iutng.edu.ua

Дан анализ современного состояния теории и практики разработки и применения винтовых забойных двигателей (ВЗД) для бурения скважин на нефть и газ. Рассмотрена конструкция и основы теории работы ВЗД, современный парк и характеристики ВЗД для бурения и ремонта вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин. Показаны особенности и преимущества ВЗД по сравнению с турбобурами.

Analysis of modern state of the theory and development practice and using of the screw downhole motors (SDM) for the wells drilling on the oil and gas has been given. Construction and bases of the theory SDM work, modern park and characteristics of SDM for the drilling and repair of the vertical, deviated and horizontal wells have been examined.

Peculiarities and advantages of SDM in comparison with the vane borers have been pointed out

Загальні положення

Відомі три основні різновиди гідравлічних двигунів, що перетворюють енергію потоку рідини в механічну енергію обертання вала. Цей поділ, відповідно до рівняння Бернуллі, ґрунтується на тому, яка складова питомої гідравлічної енергії переважно і безпосередньо використовується в машині [4].

1) Об'ємні гідравлічні двигуни, що використовують енергію тиску рідини. В цю групу, зокрема, входять поршневі, роторні та гвинтові двигуни. Поршень, на який діє тиск рідини, має в кожній машині різну конструкцію, але саме його наявність поєднує їх у єдину групу.

2) Гідравлічні турбіни, що використовують кінетичну енергію рідини. Сила, що діє на лопатки ротора турбіни, формується завдяки зміні кількості руху потоку рідини, що протікає через ротор.

3) Гідравлічні колеса, що використовують енергію стану (ваги) рідини. Зараз ці машини застосовують обмежено. Наприклад, наливні колеса та деякі інші.

Зіставлення конструкцій гідравлічних двигунів і насосів свідчить про те, що майже кожній принциповій схемі двигуна відповідає свій аналог у групі насосів. Наприклад, роторний двигун – роторний насос; осьова турбіна – осьовий насос; водяне колесо – ковшовий водопідйомник і т. д. Наявність такої аналогії вказує на один із можливих шляхів їхнього взаємного удосконалення. У деяких гідросистемах створені й застосовують обертові об'ємні машини, що можуть працювати як у режимі насоса, так і двигуна.

На сьогодні у бурінні свердловин для приводу долота застосовують тільки гвинтові двигуни й турбобури, в яких використовується енергія потоку промивної рідини.

Нижче розглянемо сучасний стан розробки гвинтових двигунів.

Історична довідка

Історія винаходу, розробки й застосування гвинтових машин має пріоритет з 1930 р., коли французький інженер Р. Муано (Moineau) запатентував пристрій із гвинтовою зубчастою парою, яка може бути використана як насос, мотор, компресор чи механічна передача [1]. Саме цей винахід визначив початок створення гвинтових машин, спершу насосів, а потім вибійних двигунів. Перевага цих об'ємних машин полягає в тому, що вони можуть бути створені в малих діаметральних габаритах. Це має важливе значення з огляду на діаметр свердловин.

Насоси Муано, що мали однозахідний ротор, почали виготовляти досить широко в 40–50-х роках 20 століття за рубежем. Тоді ж почалося їхнє застосування в різних галузях промисловості і сільськогосподарства [2].

Для буріння свердловин спершу стали застосовувати гвинтові двигуни типу “Дайна-Дрілл” із однозахідним ротором за аналогією з насосами Муано. Їх розробила й виготовляла, починаючи з 1956 року, фірма «Сміт» (США) спочатку для буріння похилих, а потім і вертикальних свердловин [3, 4].

Гвинтові двигуни з багатозахідним ротором уперше у світовій практиці були створені у ВНДІБТ (СРСР, Росія) у 1966 році. Патент ВНДІБТ на ці двигуни придбали багато країн Заходу, в тому числі й США [3, 5].



Конструкція та основи теорії роботи гвинтових вибійних двигунів (ГВД)

Отже, на відміну від турбобура, ГВД є машиною об'ємного типу. Це означає, що частота обертання вала без урахування втрат не залежить від зовнішнього завантаження ГВД, а крутний момент визначається ефективною складовою перепаду тиску.

ГВД складається з чотирьох основних вузлів.

Перший вузол – робочий орган, тобто власне двигун, що складається зі статора й ротора, що є гвинтовою зубчастою косозубою парою внутрішнього просторового циклоїдального зачеплення. Статор і ротор мають ліву нарізку. При роботі ротор обкатується по статорі, роблячи планетарний рух з ексцентриситетом, що дорівнює половині висоти зуба.

Другий вузол – шпindel із багаторядним упорним підшипником і радіальними опорами. Конструкція і призначення шпінделя аналогічні шпінделю турбобура. Через порожній вал шпінделя промивна рідина підводиться до долота.

Третій вузол – це шарнірний чи пружний вал, що забезпечує передачу потужності від ротора, що планетарно обертається, на вал шпінделя, а також передачу осьового зусилля, що формується на роторі за рахунок перепаду тиску в робочому органі. Цей вузол виконується у вигляді звичайного карданного вала з двома шарнірами, або у вигляді гнучкого вала, чи торсіона. Для зменшення довжини ГВД торсіон встановлюють у порожньому роторі.

Четвертим вузлом ГВД є переливний клапан, що розміщений у перехіднику над робочим органом. Клапан відкривається за допомогою пружного елемента всередину бурильної колони і зв'язує внутрішню порожнину бурильних труб із затрубним простором. На відміну від турбіни турбобура, промивна рідина не може протікати через робочий орган ГВД при нерухомому роторі. Тому клапан забезпечує можливість спорожнювання і заповнення колони бурильних труб відповідно при підйомі і спуску бурильного інструмента. При включенні бурового насоса клапан закривається, і весь потік промивної рідини зазвичай протікає через машину. Конструкція і принцип роботи ГВД детально викладені в [4].

Для забезпечення функціонування гвинтової машини чи насоса необхідне виконання таких умов

$$z_1 = z_2 + 1, \quad (1)$$

де z_1, z_2 – відповідно, кількість зубів (заходів) статора і ротора, як цілі числа.

Причому $z_2 \geq 1$. Кінематичне відношення позначається так: $z_2 : z_1$ чи z_2 / z_1 .

Профілі зубів статора й ротора взаємогинаючі і перебувають у безупинному контакті. Під час роботи ГВД зуби ротора ковзають по зубах статора.

Відношення кроків гвинтової поверхні статора t_1 і ротора t_2 пропорційне відношенню кількості їхніх зубів.

Звідси маємо:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{z_2}{z_1}. \quad (2)$$

Осьова довжина шлюзу дорівнює t_1 , тому довжину статора l_1 призначають у кілька разів більшу t_1 . Це дозволяє знизити міжвитковий перепад тиску, зменшити витoki й зусилля механічного тиску по контактних поверхнях зубів ротора і статора. Кількість контактних ліній (площадок), що відокремлюють вхід і вихід на довжині машини, за даними роботи [6] визначається формулою:

$$\lambda = (k - 1) z_1 + 1, \quad (3)$$

де k – кількість кроків статора в робочому органі.

Перепад тиску, який можна використовувати в робочому органі, тобто власне у двигуні ГВД, за аналогією з гвинтовим насосом пропонується визначати за формулою [6]:

$$P = P_k \cdot \lambda, \quad (4)$$

де P_k – міжвитковий перепад тиску;

λ – за формулою (3).

Величина P_k у (4) визначається властивостями еластичної обкладки статора, радіальним натягом між ротором і статором, реологічними й іншими характеристиками бурового розчину, зносом робочої пари ГВД, діаметром двигуна.

У такий спосіб величина P_k для конкретного двигуна не є величиною постійною. Її потрібно зменшувати в міру зносу робочого органу, зменшення в'язкості бурового розчину, збільшення температури в свердловині. Допустиме P_k з урахуванням викладеного прийнято призначати в межах:

$$P_k = 0,25 \div 0,50 \text{ МПа.}$$

Величина кроку статора t_1 і довжина робочого органу l_1 є важливими характеристиками ГВД і повинні вказуватися в паспорті машини. На жаль, величина t_1 не вказується.



Розглянемо тепер основи теорії робочого процесу ГВД [4].
Частота обертання вала двигуна позначається за формулою:

$$n = n_n / z_2 = i \cdot n_n, \quad (5)$$

де n_n – частота обертання осі ротора в переносному русі, тобто при обкатуванні по зубцях статора як по шестірні з внутрішнім зачепленням;

i – передавальне відношення.

Обертання осі ротора в переносному русі, якщо дивитися з боку подавання промивної рідини, йде проти годинникової стрілки і є аналогом редуктора з передавальним відношенням i .

Теоретичний обсяг рідини, тобто без урахування втрат через контактні лінії, який потрібно подати в двигун на один оборот вала, визначається формулою:

$$q_T = s \cdot t_1 \cdot z_2, \quad (6)$$

де s – площа прохідного перерізу між статором і ротором у площині, перпендикулярній до осі двигуна.

Для механізмів, сконструйованих на базі гіпоциклоїдного центроїдного зачеплення, можна використовувати вираз:

$$S = 2\pi e^2 (z_2 - 1) + 8er, \quad (7)$$

де r – радіус головки зуба;

e – ексцентриситет механізму.

У свою чергу

$$e = 0,5 h, \quad (8)$$

де h – висота зуба (вони однакові в статора і ротора).

З урахуванням виразу (6) одержуємо формулу для визначення частоти обертання ГВД:

$$n = \frac{\eta_0 Q}{q_T} = \frac{\eta_0 Q}{s t_1 \cdot z_2}, \quad (9)$$

де η_0 – об'ємний ККД двигуна.

Q – подача промивної рідини, підведена до двигуна з бурильної колони (подача бурового насоса).

З формули (9) визначають величини, що впливають на частоту обертання, зокрема, знижують її.

Ефективна потужність на вихідному валу робочого органа (РО):

$$W = Q \cdot p \cdot \eta, \quad (10)$$

де p – фактичний перепад тиску на РО;

η – повний ККД.

У свою чергу:

$$\eta = \eta_0 \cdot \eta_m = \left(\frac{q_T}{q} \right) \cdot \left(\frac{P_e}{p} \right), \quad (11)$$

де η_0 , η_m – відповідно, об'ємний і механічний ККД;

q – фактичний обсяг рідини на один оберт двигуна;

p_e – ефективний перепад тиску, що визначає момент обертання на валу ГВД.

Переважно обертовий момент визначається формулою:

$$M = W / 2\pi n, \quad (12)$$

Увівши заміну в (12) згідно (9, 10, 11) остаточно одержимо:

$$M = p \cdot \eta_m \cdot s \cdot t_1 \cdot z_2 / 2\pi, \quad (13)$$

Коефіцієнти корисної дії (11) знаходять шляхом випробування двигуна на стенді з використанням формул (9) і (13). При випробуванні при заданій подачі Q і властивостях рідини фіксують за допомогою приладів перепад тиску p у двигуні, частоту обертання n і крутний момент M . У цілому одержують залежність:

$$p, n = \varphi_1(M), \quad (14).$$

Потім, у разі потреби, змінюють вхідні величини, тобто Q і властивості промивної рідини, й одержують залежність (14) з урахуванням змінених значень вхідних величин. Випробування двигуна на стенді проводять, як правило, тільки з використанням води.

Механічний ККД (11) залежить від контактної тиску по лініях (площадках) ковзання зубів ротора по зубах статора, радіального натягу в парі ротор–статор, властивостей гуми статора, параметрів промивної рідини й насамперед від вмісту піску та коефіцієнта тертя.

Оцінки засвідчили, що найбільший вплив на η_m справляє перепад тиску на кроці статора і попередній радіальний натяг.

Згідно досліджень ВНДБТ (Росія) оптимальний натяг робочої пари ротор–статор складає при роботі на воді 0,4...1,0 мм, а на глинистому розчині густиною приблизно 1200 кг/м³ – у межах 0,2...0,6 мм. У такий спосіб при збільшенні в'язкості робочої рідини натяг можна зменшити не збільшуючи виток, а отже, не знижуючи об'ємного ККД.

При завищеному натягу ГВД можна не запустити, або при запуску він працює нестабільно. Зрозуміло, що натяг при роботі двигуна зменшується через зношення (в основному гуми статора), що зростає при збільшенні вмісту піску в промивній рідині. У зв'язку з цим при бурінні ГВД очищення промивної рідини від піску і шламу повинно виконуватися старанно, тобто доцільно застосовувати 4-стадійну систему очищення. Досвід засвідчив, що гума статора зношується рівномірно, тому з кожним статором можна відробити кілька ремонтних роторів.

Підготовка ГВД до роботи й буріння свердловини проводиться з дотриманням відомчої інструкції з експлуатації. Після роботи двигун обов'язково необхідно промити водою, інакше потім його можна не запустити.

Сучасний парк і характеристики ГВД

При складанні цього розділу використані матеріали публікацій дослідників, конструкторів, розробників і виробників ГВД Росії, роботи яких зі створення багатозахідних ГВД визнані в цілому світі і підтвердили високий рівень бурової науки й техніки в розглянутій сфері.

На сьогодні в Росії випускають більше 40 типорозмірів ГВД діаметром від 42 до 240 мм, призначених для буріння й ремонту вертикальних, похило-спрямованих і горизонтальних свердловин. ГВД виготовляють Кунгурський і Павловський машинобудівні заводи, а також завод Пермської філії ВНДБТ у кооперації з заводом НПО "Бурова техніка".

Відповідно до роботи [5] для буріння свердловин за станом на 2003 рік виготовляли 18 типорозмірів ГВД діаметром 145, 155, 172, 176, 195 і 240 мм. Для буріння ПСС і свердловин з горизонтальним закінченням у ГВД використовують як жорсткі криві перехідники, так і відхилювачі з кутом відхилення, що змінюється. Західність цих двигунів знаходиться в межах 6:7; 7:8 і 9:10.

Особливість нових ГВД полягає в застосуванні багатокрокових конструкцій, в яких довжина активної частини статора і відповідно ротора досягає 3000 і навіть 3600 мм. Це дозволяє створити при кроці статора, наприклад, $t_1 = 750$ мм, чотири і навіть п'ятикрокову конструкцію, а отже, пропорційно зменшити перепад тиску на одному кроці при збереженні загального перепаду тиску в двигуні, що приводить до підвищення ККД й ресурсу роботи машини.

Витрата промивної рідини для ГВД діаметром 145÷240 мм знаходиться в межах $(15\div50) \cdot 10^{-3}$ м³/с, а для основних машин діаметром 172÷195 мм – $(25\div35) \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Довжина цих ГВД не перевищує 7,3 м при довжині шпинделя до 3,0 м.

Нижче як приклад наведені розраховані технічні характеристики трьох ГВД діаметром 195 мм на витраті води $Q=0,034$ м³/с, що відрізняються головним чином західністю, котрі призначені для буріння долотами діаметром 215,9...295,3 мм за даними рисунка 2 з роботи [5].

Таблиця 1. Технічні характеристики двигуна ГВД при $Q=0,034$ м³/з у робочому режимі

Шифр ГВД	Довжина, мм	Активна довжина статора, мм	Західність	Частота обертання холостого ходу, с ⁻¹	Частота обертання в робочому режимі, с ⁻¹	Крутний момент, кН·м	Перепад тиску холостого ходу, МПа	Перепад тиску в робочому режимі, МПа	Потужність, кВт	ККД
Д5-195	6375	2400	9/10	2,50	2,40	4,0	1,75	4,0	60,3	0,44
Д4-195	6375	2400	7/8	3,30	3,0	4,0	2,0	4,8	75,4	0,46
ДВ-195	6375	2400	6/7	4,85	4,6	4,0	2,5	7,0	115,5	0,48

З таблиці 1 випливає, що ККД гвинтових двигунів діаметром 195 мм не перевищує 0,48, і він нижче ККД секційного турбобура типу ЗТСШ-195, що дорівнює 0,54 [4].

ГВД для буріння горизонтальних свердловин мають, як правило, вкорочений шпиндель із посиленними нижніми радіальними опорами типу метал–метал з армуванням контактуючих повер-



хонь твердим сплавом. Верхня опора шпинделя – гумово-металева з покриттям втулки зносостійким хромом.

Для ремонту свердловин розроблені 18 типорозмірів ГВД діаметром від 42 до 127 мм із західністю від 4/5 до 9/10 при довжині машини від 740 до 5800 мм. Ці двигуни використовують, починаючи від розбурювання цементних мостів і піщаних пробок до буріння бічних стовбурів, у тому числі з горизонтальним закінченням при відновленні старих, як правило неробочих, свердловин. Машини Д-42 і Д-48 призначені для роботи в свердловинах з буровими установками намотуваних НКТ (колтюбінгу) при витратах робочої рідини від 0,4 до 2,5 л/с. Вони мають західність робочих органів 9/10 і 7/8 відповідно.

Більш ніж піввіковий період застосування ГВД при бурінні свердловин у різних гірничо-геологічних умовах дозволяє визначити їхні особливості й переваги в порівнянні з турбобурами.

1. Невеликий діаметр і довжина двигуна, що має особливе значення при бурінні похилих і горизонтальних ділянок свердловин, у тому числі по різних радіусах скривлення, а також при ремонті свердловин.

2. Низькі частоти обертання при високих робочих крутних моментах, що забезпечують ефективне відпрацювання шарошкових доліт і доліт РДС.

3. Відносно невеликий перепад тиску в двигуні, що створює резерв перепаду тиску для гідромоніторного промивання вибою в межах припустимих 5 МПа.

4. Можливість використання бурових розчинів більш широкої гами за густиною, у тому числі аерованих, однак за умови забезпечення доброго очищення розчинів від вибуреної породи й піску.

5. Створення за допомогою ГВД квазігальма турбобура в так званому компаунд-двигуні або турбогвинтовому двигуні. Але довжина їх значно зростає, а ККД – значно зменшується.

Обсяги буріння свердловин за допомогою ГВД в усьому світі безупинно зростають.

У Росії в останні роки частка проходки нафтогазових свердловин за допомогою ГВД досягла 16% при обсязі буріння 2,5 млн. м у рік [5].

Література

1. Moineau R. Gear Mechanism. USA, Patent № 1892217, 27.04.1930.
2. Крылов А. В. Одновинтовые насосы. – М., Гостоптехиздат, 1962.
3. Гусман М. Т., Балденко Д. Ф., Кочнев А. М., Никомаров С. С. Забойные винтовые двигатели для бурения скважин. – М.: Недра, 1981.
4. Ясов В. Г. Погружные гидравлические буровые машины. – Л.: Вища школа, 1982.
5. Балденко Д. Ф., Коротаев Ю. А. Отечественные ВЗД и прогресс буровой техники и технологии. // Строительство н/г скважин на суше и на море. – М.: № 5 – 2003.
6. Балденко Д. Ф. Одновинтовые насосы в нефтепромысловой технике. // Бурение и нефть. – М.: № 5. – 2004.

УДК 622.24

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНТЕНСИВНОСТІ ВИКРИВЛЕННЯ СТОВБУРА ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СВЕРДЛОВИНИ НА СТІЙКІСТЬ ЇЇ СТІНОК

Д. Ю. Мочернюк

НУ "Львівська політехніка", м. Львів, вул. Коновальця, 99, кв. 2

Я. В. Куцяк, Р. Я. Куцяк

ЗАТ «НДІКБ бурового інструменту», м. Київ, пр. Палладіна, 44

Рассматриваются технологические особенности бурения искривленного участка ствола, соединяющего между собой вертикальный участок с горизонтальным, при бурении горизонтальных скважин.

The technological features of the drilling of borehole deviated zone, which joints vertical and horizontal zones at the drilling of horizontal wells are examining.

Процес будівництва горизонтальної свердловини складається з трьох станів:

- а) буріння вертикальної ділянки стовбура свердловини;
- б) буріння ділянки стовбура з набором кривизни, згідно з заданою траєкторією, з поступовим відхиленням осі свердловини від вертикалі на величину α ;
- в) буріння горизонтальної ділянки, специфічні процеси кріплення цієї ділянки та освоєння свердловини [1].

Найбільш складною частиною проекту є буріння стовбура свердловини з орієнтованою траєкторією кривизни, де поряд із відхиленням бурильного інструменту від вертикального положення часто трапляються різноманітні ускладнення з боку стінок стовбура свердловини.

