

УДК 622.245

Я. В. Кунцяк д-р техн. наук; **М. Є. Чернова**, **Р. Я. Кунцяк**, кандидаты технических наук,
М. Б. Бігун

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

УПРАВЛІННЯ ДИНАМІКОЮ РОБОТИ КОМПОНОВКИ НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Розглядається механізм утворення коливань гідродинамічних імпульсів у генераторах спрямованої дії, що можуть застосовуватися у компоновці низу бурильної колони під час буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин у нафтогазовій промисловості.

Ключові слова: генератор, гідроакустичні імпульси, свердловина, коливання.

Буріння нафтових і газових свердловин є складним і багатофакторним процесом, що супроводжується коливаннями різного виду (релаксаційними автоколиваннями, поперечними, ґрунтовими, автоколиваннями).

Релаксаційні коливання виникають при бурінні свердловин внаслідок періодичного вивільнення бурильною колоною енергії, акумульованої під час тертя бурильних замків зі стінками стовбура, при частковому розвантаженні на стінки стовбура. Найбільш значні коливання виникають в просторово деформованій стиснутій частині бурильної колони.

В процесі буріння шарошковими долотами, внаслідок перекочування зубків шарошок по поверхні вибою свердловини виникають високочастотні поздовжні коливання ($\nu = 60 \div 400$ Гц). Авторами [1] встановлено, що поздовжні коливання призводять до підвищення механічної швидкості буріння, проте, прискорюють процес руйнування опор шарошкових доліт, що призводить до суттєвого зниження проходки на породоруйнівний інструмент.

Ґрунтові коливання при роторному способі буріння відбуваються із частотою ($3 \div 6$ Гц), а при бурінні із застосуванням гвинтових вибійних двигунів із частотою ($25 \div 35$ Гц). Ґрунтові коливання є низькочастотними і високоамплітудними та часто призводять до втомного руйнування елементів бурильної колони (бурильних труб, вибійних двигунів, опор доліт).

На сьогодні в процесі буріння похило-скерованих (ПС) і горизонтальних свердловин (ГС) традиційними техніко-технологічними засобами більшість робіт, пов'язаних з набором кута, виправленнями траєкторії свердловини, проведенням скерованих і горизонтальних стовбурів здійснюється з використанням шарошкових доліт, хоча техніко-економічні показники роботи породоруйнівних інструментів, оснащених полікристалічними елементами різання (ПЕР), суттєво переважають аналогічні показники доліт шарошкових конструкцій.

Сфера застосування доліт різальної дії в процесі буріння ПС і ГС обмежена з причини ускладнень, що виникають при їх використанні в комплексі з гвинтовими вибійними двигунами та спробах оперативного управління траєкторією свердловини. Здебільшого це пов'язано зі зміною величини необхідного крутного моменту протягом поточної проходки за оберт долота, яка, в свою чергу, залежить від осьового навантаження і міцності гірських порід. Така властивість призводить до того, що навіть при незначних змінах осьового навантаження, які виникають внаслідок зависання бурильної колони на стінках свердловини і нерівномірності подачі інструменту, а також в процесі буріння перемежованих за міцністю гірських порід, величина необхідного крутного моменту різко змінюється в широкому діапазоні. Різка зміна моменту призводить до прокручування гвинтового вибійного двигуна, або його зупинки, що унеможливає поточне управління траєкторією буріння та істотно зменшує техніко-економічні показники проходки.

Підвищення техніко-економічних показників буріння ПС і ГС тісно пов'язані із дослідженнями динаміки роботи компоновки низу бурильної колони (КНБК) і породоруйнівного інструменту та розробленням технічних засобів, які забезпечать доведення ефективного осьового навантаження до породоруйнівного інструменту, підвищення механічної швидкості буріння і проходки на породоруйнівний інструмент.

Енергетичні затрати на поздовжні коливання КНБК становлять десятки кіловат. Авторами [2] встановлено, що величина поздовжніх вібропереміщень над породоруйнівним інструментом при роторному способі буріння коливається від 5 мм до 21 мм, а при резонансі амплітуда

вібропереміщення більше 50 мм. Відповідно, для ефективного використання енергії коливань КНБК необхідні аналітичні, експериментальні і промислові дослідження поздовжніх коливань бурильної колони та розроблення методів управління ними.

Дослідженням управління динамікою породоруйнівного інструменту присвячено значне число робіт на основі яких були розроблені різного типу демпферні механізми для гасіння поздовжніх коливань.

Авторами [3; 4] на основі результатів експериментальних досліджень впливу енергії поздовжніх коливань створених вібратором на механічну швидкість роторного буріння трьох шарошковим долотом було встановлено, що накладання вібрацій значно підвищує механічну швидкість буріння, приріст якої пропорційний амплітуді імпульсного навантаження створеного вібратором і статичного навантаження на породоруйнівний інструмент. При дослідженні порід із різними механічними властивостями було виявлено, що вплив вібрації на механічну швидкість буріння зменшується зі зменшенням твердості породи.

Для підвищення ефективності буріння ПС і ГС авторами [5] запропоновано застосування в КНБК гідравлічного підсилювача навантаження. В результаті використання пристроїв для гідродинамічного регулювання осьового навантаження одержано підвищення механічної швидкості буріння алмазними долотами із використанням гвинтових вибійних двигунів на 35% і на 5% при бурінні роторним способом шарошковими долотами. При бурінні 85-ти ПС свердловин на морському родовищі Махогані із застосуванням гідравлічного підсилювача навантаження виявлено зменшення майже на 45% кількості руйнувань бурильного інструменту.

Для управління динамікою бурильного інструменту науковцями запропоновані ефективні компоновки бурильних колон:

- із акустичним віброгасінням – комбінованими свічками із легкоплавних і сталених бурильних труб. На межі з'єднання свічок із різнорідних матеріалів частина енергії поздовжніх коливань відбивається назад на вибій свердловини. Оскільки, при відбиванні фаза хвилі змінюється на π , то відбита хвиля є в протифазі з ґрунтовими коливаннями долота;

- із динамічним віброгасінням, в якому між менш жорсткими і легкими сталеними бурильними трубами розміщені більш жорсткі обважені бурильні труби. У США ряд нафтогазовидобувних фірм між бурильними трубами і обважненими бурильними трубами розміщують так звану важку трубу товщина стінок якої більша ніж сталеної труби але менша ніж обваженої;

- із демпферними пристроями, які розміщені в нижній частині КНБК для гасіння поздовжніх, крутильних та поперечних коливань.

Для управління динамікою бурильного інструменту важливим технологічним аспектом є зменшення коефіцієнта тертя між замками бурильних труб та сінками стовбура свердловини. Авторами [6; 7], на основі аналітичних, експериментальних і промислових досліджень в процесі спорудження свердловин різних діаметрів з використанням вибійних двигунів та існуючих конструкцій бурових доліт, в тому числі оснащених полікристалічно-алмазними пластинами, розроблено конструкцію компоновки низу бурильної колони до складу якої увійшли опорно-центруючі елементи ексцентричної форми, що розміщуються між породоруйнівний інструментом і вибійним двигуном, на двигуні, над двигуном і між різьбовими з'єднаннями колони бурильних труб. Внаслідок цього в інтервалах прилягання колони бурильних труб до нижньої стінки стовбура свердловини навколо тіла труби утворюється кільцевий простір, що зменшує коефіцієнт тертя та покращує умови видалення вибуреної породи і винесення її на денну поверхню, а також забезпечує передавання осьового навантаження на породоруйнівний інструмент. Промислові випробування підтвердили ефективність запропонованої конструкції компоновки низу бурильної колони.

Проте, практика показала, що в більшості випадків існуючі пристрої для гасіння вібрацій не є універсальними та не в повній мірі відповідають вимогам при бурінні свердловин із різними гірничо-геологічними умовами, а відповідно, не одержали широкого застосування.

Виходячи із необхідності забезпечення високої механічної швидкості буріння стовбура свердловини за великих кутів нахилу, значних коливань величини робочого крутного моменту вибійного двигуна при змінах осьового навантаження на долото та необхідності періодичного оперативного управління траєкторією стовбура свердловини, виникає потреба в удосконаленні компоновки низу бурильної колони за рахунок додаткового оснащення її спеціальними елементами.

Найбільш ефективним і перспективним методом є застосування в КНБК спеціальних гідроакустичних пристроїв (осциляторів), які включають в себе елементи і вузли, що порушують синхронність автоколивань породоруйнівного інструменту, підсилюють енергію поздовжніх

коливань в імпульсному режимі, що сприяє більш ефективному руйнуванню гірської породи і очищення вибою свердловини та винесення вибуреної породи на денну поверхню.

На даний час існує велика кількість гідроударних механізмів, які відрізняються своїми параметрами. В роботі [8] наведено аналіз існуючих конструкцій гідроударних механізмів. Показано, що Ф. Ф. Воскресеньським, В. М. Славським, Е. І. Тагієвим розроблені вібробури з частотою 40÷50 Гц, енергією одиночного удару 100÷120 Дж при об'ємній секундній втраті рідини $Q = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$. Е. Ф. Епштейном, В. Г. Ясовим розроблено гідравлічні пристрої з технічними характеристиками :ККД – 0,38 ; частота – 28÷30 Гц, енергія одиночного удару 45÷50 Дж. В. О. Мальченком, І. А. Уткіним розроблено звукові вібратори для буріння з діапазоном частот 100÷1000 Гц які при $Q = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ створюють зусилля на долото до 46 кН. Б. З. Султановим, М. Г. Габдрахімовим, А. С. Галеєвим розроблено ряд вібраторів бурильного інструменту для роторного буріння, які працюють із частотою від 5 Гц до 100 Гц. Промислові випробування даного типу вібраторів виявили підвищення механічної швидкості буріння на 15÷25% та на 20÷38% проходки на долото при розбурюванні горизонтів складених із міцних та твердих порід.

З наведеного аналізу слідує, що існує велика розбіжність значень параметрів. Крім того, більшість дослідників не вказують у яких гірничо-геологічних умовах та в яких породах проводили буріння із застосуванням розроблених пристроїв.

У зв'язку з цим, для боротьби з ґрунтовими коливаннями долота, інтенсивно почали розроблятися гідромеханічні пристрої, більшість із яких включала клапанний вузол та маятниковий пристрій. Так, авторами робіт [9–12] проведено комплекс теоретичних, експериментальних і промислових досліджень і на їх основі розроблено цілий ряд конструкцій вібраторів клапанного типу.

Для експериментальних досліджень авторами використано методику визначення швидкості заглиблення індентора в граніт та мрамур в залежності від частоти і осьового навантаження при ударно-обертовому режимі і чисто обертовому. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень встановлено, що швидкість заглиблення індентора в мрамур зростає із підвищенням частоти до значень 220 Гц, (рис. 1), а в граніт до 110 Гц. Проте, швидкість заглиблення індентора в мрамор при ударно-обертовому режимі має значення, які майже на порядок нижчі ніж для граніту при аналогічних умовах. На основі вище наведеного авторами зроблено висновок, що для створення додаткового осьового навантаження на породоруйнівний інструмент та підвищення ефективності буріння необхідно розробляти гідродинамічні пристрої із частотним діапазоном до 145 Гц.

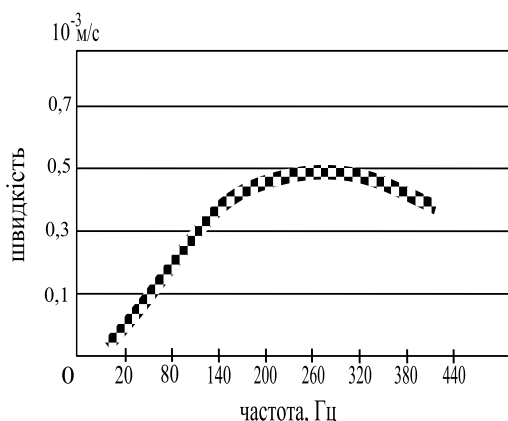


Рис. 1. Залежність заглиблення індентора в мрамур від частоти впливу за ударно-обертового режиму

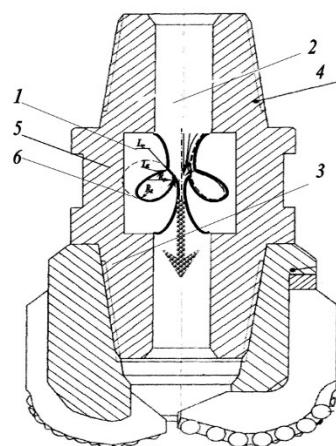


Рис. 2. Схема породоруйнівного інструменту з гідродинамічним пристроєм

Аналіз гідродинамічних пристроїв клапанного типу свідчить, що вони володіють низькими енергетичними характеристиками (енергія одиночного удару в межах від 50 до 450 Дж) і застосування їх при бурінні свердловин глибиною від 1500 м до 2000 м призводить до підвищення механічної швидкості буріння на (12÷20%) та підвищення проходки на долото (25÷35%) Крім того, наявність рухомих механічних частин часто призводить до їх втомного руйнування, що вимагає негайного піднімання бурильної колони.

На основі вище наведеного слідує, що існуючі конструкції гідромеханічних пристроїв не в повній мірі відповідають вимогам при бурінні глибоких ПС і ГС, а також при забурюванні бокових

стовбурів в процесі відновлення свердловин. Відповідно, виникає необхідність в проведенні теоретичних, експериментальних і промислових досліджень динаміки роботи КНБК і розроблення на їх основі ефективних конструкцій гідроакустичних пристроїв та удосконалення технології буріння із їх застосуванням.

На початковій стадії досліджень нами використано гідроакустичний пристрій, який був запропонований авторами [13]. Гідроакустичний пристрій розміщується в стакані і має форму сопла з двома циліндричними вихровими камерами, розміщеними по обидва боки прохідного каналу. Краї циліндричних вихрових камер, які виступають назустріч потоку рідини, захоплюють частину потоку і створюють обертовий рух. Взаємодія обертових і прохідних потоків викликає коливний рух струмини. На основі результатів експериментальних та промислових досліджень було визначено оптимальні конструктивні параметри гідроакустичного пристрою, частотні і енергетичні характеристики. Встановлено, що потужність і частота коливань змінюється в залежності від значення гідродинамічного тиску потоку рідини (газу). Частотний діапазон даного пристрою від 10 Гц до 150 Гц.

Аналізуючи результати досліджень даної конструкції гідроакустичного пристрою виникла ідея у розробленні нових конструкцій гідроакустичних генераторів, які б володіли значно більшою потужністю в заданому інтервалі частот, що уможливило би їх застосування при бурінні глибоких похило-скерованих і горизонтальних свердловин у складних гірничо-геологічних умовах.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено конструкцію генератора гідроакустичних імпульсів, який відповідає поставленим вимогам [14] Схематичне зображення запропонованої конструкції генератора гідроакустичних імпульсів, що з'єднаний з породоруйнівним інструментом наведено на рис. 2.

Гідроакустичний генератор складається з корпусу – 1 циліндричного перерізу з конічною різьбою у верхній і нижній частинах – 2, стінки якого утворюють наскрізний канал – 3. В середині каналу розміщені акустичні генератори коливань з вхідним каналом конічної форми – 4, концентратором потоку – 5, вихровою акустичною камерою – 6, що виконана у формі тора або параболічної чи еліптичної форми. Генератор приєднується нижньою частиною різьбового з'єднання до породоруйнівного інструменту, а верхнім кінцем різьбового з'єднання до елементів КНБК. Промивальна рідина під тиском потрапляє у вхідний отвір конічної форми, в якому виникає явище турбулентності, де відбувається взаємодія потоків осьового та приграничного шарів рідини, що призводить до змішування шарів, спостерігається випередження ядра центрального шару. Це веде до збільшення швидкості та нагромадження енергії. В концентраторі потоку за рахунок інтенсивного вирівнювання швидкостей виникають пульсації значної потужності. Приграничний шар після концентратора потоку потрапляє в камеру завихрення де набуває високої турбулентності і на виході з камери взаємодіє з осьовим шаром промивальної рідини. В результаті взаємодії шарів трьох потоків рідини, які рухаються з великими швидкостями і тиском, виникають поздовжні гідроакустичні коливання рідини значної потужності, частота яких залежить від конструктивних параметрів генератора та початкового тиску. Пульсуючий потік промивальної рідини через дифузор потрапляє в породоруйнівний інструмент з наявними промивними каналами. Відбувається перерозподіл енергії потоку таким чином, що частина енергії переноситься потоком рідини через промивні канали та сприяє підвищенню ефективності очищення вибою свердловини [15] а решта енергії йде на виникнення додаткових поздовжніх коливань породоруйнівного інструменту, що призводить до підвищення осьового навантаження на породоруйнівний інструмент. Оскільки механізм відбувається в імпульсному режимі з частотою, яку задає генератор гідроакустичних коливань, то руйнування гірської породи відбувається під впливом сколююче-коливних процесів.

За теоретичними розрахунками, застосування генераторів гідроакустичних коливань в процесі буріння свердловин, сприяє підвищенню механічної швидкості буріння на 35÷45% та підвищення довговічності породоруйнівного інструменту до 40%.

Для підтвердження теоретичних розрахунків були проведені промислові випробування під час буріння свердловини 10 Ковильненська (АР Крим). Буріння проводилось долотом Ø 215,9 HE44D3VRS Varel до верхньої частини якого під'єднано гідроакустичний генератор запропонованої конструкції. Буріння проводилось в інтервалі 3877÷3905 м з використанням глинистої промивальної рідини при об'ємній витраті 36 л/с. Навантаження по ГІВ-6 становило 12 т. В процесі буріння по станції контролю спостерігалось коливання навантаження на долото від 9 до 16 т, хоча ГІВ-6 фіксував стабільне навантаження 12 т. Коливання тиску на вибої свердловини складало 80–95 атм, хоч станція фіксувала стабільний тиск 80 атм. Шлам на ситах складав 90% глини.

На основі аналізу отриманих результатів було відмічено підвищення механічної швидкості буріння лише на 13%, що пояснюється бурінням глинистого інтервалу, в якому відбувається поглинання великої частини енергії гідроакустичних коливань, а вказаний відсоток забезпечується підвищенням ефективності очищення вибою свердловини, та покращенням реологічних властивостей промивальної рідини під дією гідроакустичних коливань.

Дослідження на денній поверхні піднятого зі свердловини генератора виявило значний гідроабразивний знос країв вихрової камери, що й призвело до зниження к.к.д пристрою. Для підвищення довговічності гідроакустичного генератора рекомендовано вихрову камеру виготовляти із застосуванням твердосплавних пластин та проводити армування поверхні.

Висновки

1. На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено конструкції гідроакустичних генераторів регульованої частоти й потужності, придатні для ефективного буріння глибоких похило-скерованих свердловин як роторним способом так із застосуванням гвинтових вибійних двигунів за об'ємної витрати промивальної рідини 8÷40 л/с.

2. Розроблений пристрій дозволяє проводити буріння свердловин із застосуванням алмазних та шарошкових доліт.

3. Застосування пристроїв гідроакустичних коливань забезпечує підвищення реологічних властивостей промивальних рідин та ефективність очищення вибою свердловини.

4. Коливання тиску промивальної рідини на вибої свердловини складає 20÷30%, а навантаження на породоруйнівний інструмент сягає 80÷90%. Суттєве підвищення ефективності буріння з використанням гідроакустичних генераторів, розмішених над долотом, або безпосередньо в долоті, відбувається при бурінні свердловин у твердих гірських породах.

Рассматривается механизм образования колебаний гидродинамических импульсов в генераторах направленного действия, которые могут применяться в компоновке низа бурильной колонны при бурении наклонных и горизонтальных скважин в нефтяной промышленности.

Ключевые слова: генератор, гидроакустические импульсы, скважина, колебания.

We consider the mechanism of formation of oscillations of hydrodynamic impulses in directional generators that may be used in the bottom-hole assembly during drilling of directional and horizontal wells in petroleum industry.

Key words: generator, hydroacoustic impulses, well, oscillations.

Література

1. Абдуллин Р. А., Шашин А. А. Трубецкой Н. И. Пути повышения скорости бурения за рубежом. – Обзор информ.: Бурение. – М.: ВНИИОЭНГ, 2007. – №18.
2. Чупров В. П., Сираев А. Х., Молчанов А. А. Применение автономных приборов с магнитной регистрацией для измерения параметров вибрации бурового инструмента // Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – М.: 1996. – №6. – С. 26–29.
3. Воскресенский Ф.ФЫ., Кичигин А.В. Вибрационное и ударно-вращательное бурение. – М.: Гостоптехиздат, 1991. – 243 с.
4. Вульфсон И. И. Тышкин А. П. Динамический разгрузатель рессорного типа с зарезонансной частотой настройки // Изв. ВУЗов, Машиностроение, 1990. – 310. – С. 21–25.
5. Корлес А. Джайлс и Тони Сисахей, Smith International INC.; Вилмарк Джонетти, Trinpet Services. Гидравлические усилители нагрузки повышают эффективность бурения // Нефтегазовые технологии. – 2002. – №1. – С. 50–54.
6. Пат. 16717 Україна, МПК Е 21 В 7/06, 17/00. Компоновка низу бурильної колони/ Кунцяк Р.Я., Булатов К.В., Кунцяк Я.В., Чернов Б.О., Мартинюк Д.М.; Заявник і патентовласник ЗАТ «Науково-дослідне конструкторське бюро бурового інструменту». – №u200602556; заявл. 19.03.06, опубл. 15.08.06, Бюл. №8.
7. Пат. 58151 Российская федерация, МПК 7 Е 21 В 7/06, 17/00. Компоновка низу бурильної колони/ Р.Я. Кунцяк, К.В. Булатов, Я.В. Кунцяк, Б.О. Чернов, Д.М. Мартинюк; Заявитель и патентовладелец ЗАО «Научно-исследовательское конструкторское бюро бурового инструмента». - №2006122491; заявл. 19.05.06, опубл. 10.11.06, Бюл. №31.
8. Хузина Л.Б. «Повышение эффективности бурения наклонных и горизонтальных скважин с использованием комплекса виброусилителей» // Диссертация на соискание степени доктора технических наук, - Уфа – 2006. – с. 245.

9. Офиц. бюл. Изобретения. Полезные модели. – 2004. №34. Патент 2241816 CI RU, E 21 В 7/24. Скважинный вибратор/ Н.М. Габдрахимов, Л.Б.Хузина, М.С. Габдрахимов, Л.М. Габдрахимова - №2003104929/03.
10. Хузина Л.Б., Габдрахимов М.С. Многоступенчатый виброусилитель для разрушения ухабообразного забоя// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №8. – С.298–301.
11. Хузина Л.Б., Габдрахимов М.С. Наддолотный маятниковый вибратор // Нефтегазовое дело. – 2005. – <http://www.ogbus.ru/authors/Khuzina/Lhuzina/1/pdf>.
12. Габдрахимов М.С., Хузина Л.Б. Оптимальный диапазон частот гидроударных машин для эффективного бурения глубоких скважин // Реализация государственных образовательных стандартов при подготовке инженеров – механиков: проблемы и перспективы: материалы II Всероссийской учебно-науч. метод. конф. – Уфа: Из-во УГНГУ, 2003. – С.244–247.
13. А.с. 1839516 СССР Е 21 В 43/00, 43/25. Гидродинамический излучатель для обработки призабойной зоны/ Б.А. Чернов, Я.Д. Климишин, И.С. Бабюк, Я.Б. Чернов (СССР) №4735555/03. Заявл. 05.09.89; опубл. 15.01.93. – Бюл.№2.
14. Пат. 63187 Україна, МПК Е 21 В 28/00. Генератор гідроакустичних імпульсів / Б.О.Чернов, М.Є.Чернова, І.М.Ільків, М.М.Западнюк, О.А.Мозолев, Заявник і патентовласник Чернов Б.О. – №u201105983; заявл. 13.05.11, опубл. 26.09.11, Бюл. №18.
15. Кунцяк Я.В., Чернова М.Є., Бігун М.Б. Дослідження механізму коливних процесів у генераторі гідродинамічних імпульсів спрямованої дії // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2014, вып. № 17. – С. 160–166.

Надійшла 21.07.15

УДК 622.24

А. А. Кожевников, д-р техн. наук¹, А. А. Борисевич¹, Б. Т. Ратов², д-р техн. наук

¹Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепрпетровск, Украина

²Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, г. Алматы

ПУТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В статье рассмотрены пути практической реализации бурения с импульсным вращением породоразрушающего инструмента. В работе показано, что технология бурения с импульсным вращением породоразрушающего инструмента может реализовываться на практике как с вращением буровой колонны, так и без ее вращения.

Ключевые слова: бурение, импульсное вращение, привод, породоразрушающий инструмент.

Механическое вращательное бурение в зависимости от характера вращения породоразрушающего инструмента может осуществляться по двум технологиям:

- 1) технология бурения с постоянной частотой вращения породоразрушающего инструмента $n = const$;
- 2) технология бурения с переменной частотой вращения породоразрушающего инструмента во времени, т. е. с импульсным вращением $n = var$ [1; 2].

В последнем случае другие параметры режима бурения (осевая нагрузка F , количество промывочной жидкости Q) могут быть как постоянными ($F = const$, $Q = const$), так и переменными ($F = var$, $Q = var$).

Таким образом, технология бурения с импульсным вращением породоразрушающего инструмента может быть:

- 1) монопараметрической $n = var$, а $F = const$, $Q = const$ (рис.1 а);