

© А.В. Павличенко¹, А.О. Ігнатів¹, Є.А. Коровяка¹,
С.Є. Барташевський¹, І.Ю. Коротка², М.Р. Мекшун¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² ТОВ «Нафторинок», Київ, Україна

ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ГІДРАВЛІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СВЕРДЛОВИН

© A. Pavlychenko¹, A. Ihnatov¹, Ye. Koroviaka¹,
S. Bartashevskiy¹, I. Korotka², M. Mekshun¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Naftorynok LLC, Kyiv, Ukraine

FUNDAMENTALS OF ORGANIZING A HYDRAULIC WELL CLEANING SYSTEM

Мета. Обґрунтування параметрів прогресивної комплексної гідравлічної програми очищення вибою і стовбура споруджуваної свердловини, що базуються на методах вивчення фізико-хімічної взаємодії бурової промивальної рідини (газорідинної суміші) із продуктами руйнування гірського масиву.

Методика дослідження. Аналітичні та лабораторні дослідження особливостей створення і реалізації прогресивної комплексної гідравлічної програми очищення вибою і стовбура споруджуваної свердловини виконано із застосуванням сучасних методів аналітичного аналізу і експериментальних досліджень, зокрема шляхом використання загальних принципів математичного та фізичного моделювання, методик обробки результатів досліджень у середовищі EXCEL, MATHCAD, контрольно-вимірювальних приладів і матеріалів. Протікання свердловинних бурових циркуляційних процесів моделювалось на експериментальних свердловинах навчального бурового полігону Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» із застосуванням бурової установки УКБ-4П та відповідного допоміжного інструменту й обладнання.

Результати дослідження. Розглянуто ключові питання вдосконалення способу буріння із застосуванням очисних агентів нормальної та зниженої густини. Вивчено особливості фізико-хімічних взаємодій на межі розділу фаз в системі «очисний агент - гірська порода». Приведені ґрунтовні відомості з основних конструктивно-технологічних особливостей окремих вузлів ланцюжка отримання очисних агентів зниженої густини. Переконаливо доведена необхідність ретельного підходу до процесу регулювання значення рівня рН очисних агентів з урахуванням геолого-технічних умов проведення бурових робіт і цільового призначення свердловин. Промивальну рідину, оброблену постійним електричним струмом і такою, що набула певних значень водневого показника рН, можна застосовувати з метою підвищення техніко-економічних показників буріння свердловин.

Наукова новизна. Максимальна ефективність поверхнево-активних речовин, як неодмінного компонента бурової промивальної рідини (газорідинної суміші), визначається активністю їх полярних молекул, причому введення до складу промивальної рідини поверхнево-активних речовин забезпечує значне зменшення енерговитрат на реалізацію досконалого процесу спорудження бурової свердловини.

Практичне значення. Логічно і послідовно розглянуто питання впливу параметрів очисного агента на вибійні процеси руйнування порід; взаємозв'язку між фізико-геометричними характеристиками продуктів руйнування і циркуляційними процесами на вибої і в стовбурі свердловини; особливостей схеми циркуляції очисного агента, пов'язані з різноманітністю геолого-технічних факторів.

Ключові слова: бурова промивальна рідина, спорудження свердловин, поверхнево-активна речовина, гірська порода, продукти руйнування, шлам, гідравлічна програма очищення, кавітація, активована рідина, пристрій.

Вступ. Пошук покладів, у тому числі вуглеводневої сировини, і економічно обґрунтоване освоєння родовищ різноманітних корисних копалин потребує проведення широкомасштабних геологічних досліджень з метою отримання надійної інформації про запаси та здійснення комплексних робіт із спорудження експлуатаційних каналів зв'язку продуктивних пластів з наземним видобувним обладнанням, що може бути виконано виключно шляхом буріння свердловин [1]. Проте процеси спорудження свердловин були і залишаються надзвичайно капіталомістким. Одну з основних частин витрат на будівництво свердловин складають витрати на видалення продуктів руйнування (шламу зруйнованих спеціальним інструментом гірських порід) з вибою на поверхню. Таке положення обумовлене, серед іншого, відсутністю науково і практично обґрунтованих рекомендацій з вибору основних параметрів технологічного процесу очищення, які носять переважно якісний характер. Рекомендовані швидкості транспортуючого продукту руйнування висхідного потоку недостатньо диференційовані для конкретних умов буріння, відсутня єдність поглядів на вплив режимів течії, показників властивостей бурових промивальних рідин і частоти обертання бурильних труб на транспортуючу здатність висхідного потоку очисного агента [2]. Традиційні розрахунки транспортуючої здатності бурових промивальних рідин базуються на експериментах із визначення швидкості осадження часток шламу в рідинах, що покояться. Окрім зазначеного, слід підкреслити наступне: розширення асортименту дисперсних систем, що застосовуються при бурінні свердловин, зумовлює необхідність проведення глибоких і всебічних досліджень з вивчення фізико-хімічних явищ, які мають місце та використовуються при створенні, приготуванні й застосуванні промивальних рідин, і їх впливу як на окремі процеси (вибійне руйнування гірського масиву), так і на весь цикл буріння свердловин [3].

Актуальність досліджень. Найважливішим способом підвищення техніко-економічних показників комплексного процесу буріння є вибір оптимальних параметрів режиму спорудження свердловин. Рекомендації за технологією буріння свердловин різного призначення, вибором способу буріння, типу устаткування і породоруйнівного інструменту а, особливо, методики проектування параметрів режиму буріння недостатньо обґрунтовані, що гальмує освоєння нової техніки і прогресивної технології [1].

Нині існують різні точки зору на те, який з показників процесу буріння може служити критерієм оптимізації. Наприклад, за критерій оптимізації приймають проходку на породоруйнівний інструмент, вартість метра проходки свердловини, механічну, рейсову і комерційну швидкості тощо. Кожен з приведених критеріїв

характеризує протікання процесу буріння протягом певного періоду. Одні з них (наприклад миттєва механічна швидкість, витрати потужності на обертання і привод бурового насоса, інтенсивність зносу породоруйнівного інструменту) визначають характер протікання процесу в даний момент і можуть служити для безпосереднього регулювання режиму буріння. Інші (рейсова швидкість, проходка за рейс) характеризують протікання процесу в течії циклу і на підставі цих даних можуть бути спроектовані параметри режиму буріння для пройденого інтервалу і інших інтервалів зі схожими умовами. Такі критерії, як вартість метра буріння, час і глибина буріння, комерційна і технічна швидкості дозволяють вирішувати також питання про вибір породоруйнівного інструменту і устаткування. В той же час є очевидною необхідність розробки такої методики проектування параметрів режиму буріння, яка б враховувала один з основних параметрів – витрату бурової промивальної рідини (очисного агенту), що в нині застосовуваних методиках недостатньо розроблено. Таким чином, актуальність створення науково обґрунтованої методики проектування параметрів режиму промивання обумовлена потребами геологорозвідувальної та видобувної галузей [2].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Процес спорудження свердловин супроводжується утворенням шламу (зруйнована породоруйнівним інструментом гірська порода). Причому, ефективність буріння в складних гірничо-геологічних умовах багато в чому залежить від якісного очищення вибою свердловини і самого бурового розчину від шламу. Цим питанням присвячена велика кількість науково-практичних робіт, в яких основна увага приділяється встановленню необхідної швидкості висхідного потоку, що забезпечує винесення часток вибуреної породи [4].

За найбільш застосовуваної прямої схеми циркуляції, промивальна рідина нагнітається буровим насосом в замкнуту циркуляційну систему, проходить униз по колоні бурильних труб, захоплює в привибійній частині свердловини шлам, охолоджує породоруйнівний інструмент і по кільцевому простору між бурильними трубами і стінками свердловини виходить на поверхню (описана схема руху є дещо спрощеною, вона не враховує можливість знаходження на нижньому кінці бурильної колони вибійного двигуна та інших можливих компоновок, проте це не має жодного впливу на кінцеві результати інтерпретації свердловинних циркуляційних процесів) [5].

Пряма схема очищення відрізняється простотою виконання і забезпечує процес буріння в умовах поглинання промивальної рідини, але необхідність створення високої швидкості висхідного потоку в затрубному просторі приводить в м'яких породах до розмиву стінок свердловини [2].

Практикою буріння встановлено: якщо вміст шламу в промивальній рідині перевищує 5% за об'ємом, це загрожує аварією. Наявність значного об'єму шламу на вибої призводить до зниження швидкості буріння. Це може викликати помилкову думку, що розкриті твердіші або більш абразивні породи. Насправді в таких випадках часто має місце багатократне подрібнення шламу, після чого він виноситься потоком бурового розчину. Усе це вимагає додаткових витрат і засобів, не дивлячись на те, що гідравлічна програма буріння повністю виконується.

При розбурюванні м'яких порід (глина, крейда та ін.) може статися укрупнення дрібних часток вибуреної породи шляхом їх злипання, внаслідок чого різко знижується здатність бурового розчину виносити шлам зі свердловини. Можуть бути і інші причини зниження транспортуючої здатності бурового розчину внаслідок зменшення швидкості висхідного потоку, що призводить до погіршення очищення свердловини від шламу. Найчастіше це спостерігається в кавернах, в яких зниження швидкості висхідного потоку сприяє накопиченню в них шламу. За наявності у свердловині однієї або декількох каверн, як правило, процес буріння супроводжується тривалими опрацюваннями вже пройденого бурінням стовбура свердловини і винесенням великих об'ємів часток породи, що обсіпалися зі стінок свердловини, і накопиченням в кавернах шламу [6].

Здійснення винесення шламу збільшенням продуктивності бурових насосів в описаних умовах опиняється малоефективним внаслідок різкого збільшення гідравлічних опорів і появи інших негативних явищ. Для боротьби з ускладненнями зазвичай збільшують густину бурового розчину. Проте вказаний підхід є обмеженим, оскільки за нього зростає репресія на пласт, що призводить до розкриття тріщин і поглинання бурового розчину. При поглинанні розчину швидкість висхідного потоку також знижують, і знову створюються умови, коли шлам не виноситься зі свердловини [7].

Витрата промивальної рідини визначає швидкість руху потоку в різних перерізах бурової свердловини. У кожному конкретному випадку буріння існує раціональна витрата промивальної рідини, за якої з найменшими витратами можуть бути отримані кращі результати буріння.

Енергія потоку промивальної рідини забезпечує очищення вибою від зруйнованої породи, винесення шламу зі свердловини, охолодження породоруйнівного інструменту, сприяє руйнуванню породи на вибої, використовується для приводу вибійних двигунів і механізмів. Для вирішення кожного конкретного з цих завдань потрібна певна енергія потоку.

Вибір раціональної витрати промивальної рідини повинен здійснюватися з урахуванням усіх обмежуючих обставин; він є важливим завданням, що визначає ефективність процесу буріння. Мінімальна витрата очисного агента в загальному випадку повинна забезпечувати рішення таких основних завдань: очищення вибою свердловини від зруйнованої породи, очищення стовбура свердловини, охолодження породоруйнівного інструменту. Витрата має бути достатньою для надійного і стійкого транспортування шламу з вибою до гирла споруджуваної свердловини [2].

Мета статті – цілісне і послідовне обґрунтування параметрів прогресивної комплексної гідравлічної програми очищення вибою і стовбура споруджуваної свердловини, що базуються на методах вивчення фізико-хімічної взаємодії бурової промивальної рідини (газорідинної суміші) із продуктами руйнування гірського масиву.

Обґрунтування вживання і опис вибраної автором методики. Спеціальні аналітичні та лабораторні дослідження особливостей створення і реалізації про-

гресивної комплексної гідравлічної програми очищення вибою і стовбура споруджуваної свердловини виконано із застосуванням сучасних методів аналітичного аналізу і експериментальних досліджень, зокрема шляхом використання загальних принципів математичного та фізичного моделювання, методик обробки результатів досліджень у середовищі EXCEL, MATHCAD, контрольно-вимірювальних приладів і матеріалів [8]. Протікання відповідних свердловинних бурових циркуляційних процесів моделювалось на експериментальних свердловинах навчального бурового полігону Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» із застосуванням бурової установки УКБ-4П та відповідного допоміжного інструменту й обладнання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Найбільш застосовуваним методом проектування режимів буріння є такий, що заснований на вивченні фізико-механічних властивостей гірських порід. Вивчення вказаних властивостей здійснюється, в основному, на зразках вибуреної породи за стандартизованою методикою. На підставі визначення фізико-механічних характеристик гірських порід встановлюється мінімальне осьове навантаження, що забезпечує об'ємне руйнування, кількість промивальної рідини, що вимагається для очищення вибою і винесення розбурених часток шламу зі свердловини. В основному ця методика набула поширення в роторному бурінні. До її недоліків слід віднести те, що не беруться до уваги стан бурового устаткування і інструменту, необхідна потужність приводу бурового агрегату [9].

До іншої групи відноситься методики проектування режимів буріння, засновані на даних отриманих у виробничих умовах. Існує два підходи до визначення раціональних параметрів буріння.

У першому випадку дослідник, маючи дані про параметри режиму буріння, геологічний розріз свердловини і фізико-механічні властивості порід, стан устаткування та породоруйнівного інструменту: його тип і проходку, вибирає раціональне поєднання параметрів, що забезпечують оптимізацію процесу буріння за одним з критеріїв: максимум механічної або рейсової швидкості, максимум проходки на породоруйнівний інструмент, мінімум вартості метра буріння свердловин тощо. Вибір цей може здійснюватися за допомогою методів математичної статистики та планування експерименту. Недоліком описуваної методики є те, що досліджуються режими буріння, що застосовувалися виключно у виробничих умовах, так само як і породоруйнівний інструмент. У той же час може виявитися, що застосування цього типу породоруйнівного інструменту при наявних режимах не показало усіх його можливостей і при вищих значеннях окремих параметрів результат міг би бути кращим.

З метою ліквідації вказаних недоліків удаються до удосконалення методики, яка полягає в наступному. Маючи відомості про те, які типи породоруйнівного інструменту дають найкращі результати на певній ділянці або інтервалі буріння, для них підбирають найкраще поєднання параметрів режиму буріння. Для цього здійснюють велику кількість досліджень з варіюванням окремих параметрів, залишаючи інші постійними. Спосіб досить громіздкий, вимагає проведення як стендових, так і виробничих випробувань, обов'язкової наявності контрольно-

вимірювальної апаратури. Але в теж час, він дозволяє найточніше визначити раціональне співвідношення частоти обертання, осьового навантаження і кількості промивальної рідини для певного породоруйнівного інструменту в конкретних геологічних умовах досліджуваного району і в стислі терміни може допомогти налагодити високопродуктивне буріння при переведенні в інший район з аналогічними або близькими геолого-технічними умовами.

До цієї ж групи можна віднести методика, засновану на бурінні опорно-технологічних свердловин з метою отримання вже на початку розбурювання площі достатньої інформації для обґрунтованого вибору способу буріння, типів породоруйнівного інструменту, а також раціональних параметрів режиму буріння з використанням новітніх технічних засобів.

Виходячи із сказаного, як критерій оптимізації можна застосувати потужність насоса, яка визначається перепадом тиску, продуктивністю насоса і механічним ККД [10]

$$N = \frac{PV}{\eta}, \quad (1)$$

де P – робочий тиск насоса, Па; Q – об'ємна продуктивність, м³/с; η – ККД насоса.

В цілому витрату промивальної рідини визначають виходячи з таких умов:

а) з умови очищення вибою від вибуреної породи

$$Q_1 = q_0 F_{виб}, \quad (2)$$

де q_0 – питома витрата промивальної рідини, м³/с на 1 м² вибою ($q_0 = 0,35 - 0,5$ – при роторному способі і бурінні електробуром; $q_0 = 0,5 - 0,7$ – при бурінні гідравлічними вибійними двигунами); $F_{виб}$ – площа вибою свердловини, м².

б) з умови транспортування шламу в кільцевому просторі

$$Q_2 = V_{min} F_{кн}, \quad (3)$$

де V_{min} – мінімально припустима швидкість руху промивальної рідини в кільцевому просторі, м/с (у скельних породах приймають $V_{min} = 0,7 - 1,0$ м/с; у м'яких $V_{min} = 1,0 - 1,4$ м/с; при бурінні долотами великого діаметра $V_{min} = 0,3 - 0,5$ м/с).

Гідравлічні втрати тиску в елементах циркуляційної системи визначають за наступною методикою [11]

$$P = P_m + P_{кн} + P_z + P_{ОБТ} + P_{кнОБТ} + P_{обв} + P_\delta, \quad (4)$$

де P – сумарні гідравлічні втрати тиску в циркуляційній системі, Па; P_m – втрати тиску в бурильних трубах, Па; $P_{кн}$ – втрати тиску в кільцевому просторі за бурильними трубами, Па; P_z – втрати тиску в замках і муфтах, Па; $P_{ОБТ}$ – втрати тиску в ОБТ, Па; $P_{кнОБТ}$ – втрати тиску в кільцевому просторі за ОБТ, Па; $P_{обв}$ – втрати тиску в наземній обв'язці (стояку, буровому шланзі, ведучій трубі, вертлюзі), Па; P_δ – втрати тиску в долоті, Па.

Вивчення широкого кола літературних джерел та даних дослідницьких і виробничих організацій стосовно питань розробки гідравлічної програми промивання свердловин доводить [1, 4], що вживані при бурінні промивальні рідини є

складними фізико-хімічними дисперсними системами з сильно розвиненими поверхнями розділу фаз. Промивальні рідини створюють середовище, в якому протікають основні процеси циклу спорудження свердловин, крім того вони визначають міру використання потенційних можливостей і ресурс бурового устаткування і інструментів, механічну швидкість, вірогідність виникнення різного роду ускладнень тощо [10].

Вибір промивальної рідини, найбільш повно відповідної до кожної конкретної ситуації, здійснюється з урахуванням вимог, що пред'являються до них, виконання яких забезпечується великою кількістю функцій робочого середовища: 1) очищення забою від зруйнованої гірської породи і винесення її на поверхню; 2) утримування часток зруйнованої гірської породи в зваженому стані в стовбурі свердловини при припиненні циркуляції; 3) закріплення нестійких стінок свердловини і оберігання стовбура від обвалення; 4) фізико-хімічний вплив на гірські породи, що має за мету полегшення їх руйнування; 5) охолодження породоруйнівного інструменту; 6) утворення на поверхні бурильних труб, опор доліт і гідравлічного устаткування тонких мастильних плівок, що забезпечують зниження енергетичних витрат на буріння та ін. Основні вимоги та обмеження, що висуваються до промивальних рідин та процесу свердловинної циркуляції бурового агенту в цілому, наведено в табл. 1 [2].

Таблиця 1

Робочі та обмежувальні вимоги до складових гідравлічної програми промивання свердловин

Узагальнені функції	Технологічні обмеження
Руйнувати вибій	Не руйнувати долото, бурильний інструмент і устаткування
Очищати вибій від шламу і транспортувати шлам на денну поверхню	Не розмивати стовбур свердловини Не призводити до поглинань розчину і не піддавати гідророзриву пласти
Компенсувати надлишковий пластовий тиск флюїдів	Не погіршувати проникність продуктивних горизонтів
Попереджати обвали стінок свердловини	Не призводити до високих втрат гідравлічної енергії
Зважувати компоненти розчину і шлам	Не скидати у відвал компоненти бурового розчину
Скидати шлам у відвал	Не викликати осипів і обвалів стінок свердловини
Змащувати і охолоджувати долото, бурильний інструмент і устаткування	

Для ефективного виконання визначених функцій в різних геолого-технічних умовах буріння свердловин, промивальні рідини повинні мати певні значення показників властивостей, визначуваних їх компонентним складом та концентрацією [12].

Узагальнення передового досвіду показало, що тільки відповідні технологічні властивості промивальних рідин і досконала технологія промивання (іншими словами – гідравлічна програма) у поєднанні з сучасним породоруйнівним інструментом і устаткуванням дозволяє досягти найвищих техніко-економічних показників при спорудженні свердловин [2].

Таблиця 2

Узагальнені дані по родовищах ДДЗ з впливу густини і умовної в'язкості бурового розчину на показники роботи шарошkových доліт

Умовна в'язкість за СПВ - 5, с	Густина циркулюючого бурового розчину, кг/м ³				
	1200	1240	1300	1340	1400
	Механічна швидкість проходки, м/год				
20 - 40	7,5	6,2	6,5	5,3	4,3
40 - 60	7,2	7,1	5,7	4,9	4,1
60 - 80	6,5	6,2	4,2	4,1	4,1
80 - 120	5,1	3,6	3,7	3,2	3,2

На прикладі ряду нафтогазоконденсатних родовищ Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) ґрунтовними теоретично-прикладними дослідженнями показаний комплексний вплив густини, в'язкості і водовіддачі бурового розчину на показники роботи шарошkových доліт (табл. 2 і 3) [4], зазначені характеристичні дані були в наступному підтверджені багатьма іншими дослідниками.

Таблиця 3

Узагальнені дані по родовищах ДДЗ з впливу густини і водовіддачі бурового розчину на показники роботи шарошkových доліт

Густина бурового розчину, кг/м ³	Водовіддача, см ³ за 30 хв на приладі ВМ - 6					
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30	>30
	Механічна швидкість проходки, м/год					
1200 - 1240	7,7	8,4	8,6	8,8	9,5	9,6
1240 - 1280	6,4	7,7	8,1	8,4	8,2	8,7
1280 - 1320	5,8	6,6	7,5	7,9	8,0	8,8
1320 - 1360	4,9	6,4	7,2	7,1	7,8	8,1
1360 - 1400	4,8	5,6	6,3	6,9	7,3	7,9

Аналіз наведених даних свідчить про те, що найбільш суттєвим чинником, що визначає забійні умови руйнівних процесів є густина бурової промивальної рідини, дещо менш значний вплив чинять в'язкість і водовіддача.

Встановлено, що найсуттєвіше на темп поглиблення впливають густина бурового розчину і вміст в ній твердої фази.

В результаті дослідницьких робіт, проведених в НТУ «ДП», встановлено, що поліпшити деякі властивості промивальних рідин (зокрема: інертність до оточуючих порід, мастильну здатність, прокачуваність, здатність до покращення процесів руйнування порід на вибої), можна введенням до їх складу поверхнево-активних речовин (ПАР) і різних мастил, наприклад нафти. Проте, дисперсні системи, що містять нафту, мають ряд недоліків: підвищена вартість, обумовлена додаванням великої кількості нафти, необхідність ретельного контролю її вмісту, прискорений знос гумових частин бурового устаткування і ін. Саме це є підґрунтям для розширення застосування в технології буріння ПАР різних композицій. В результаті застосування таких речовин спостерігали наступне: при роторному способі буріння проходка на долото збільшилася на 23%, стійкість доліт на 17%, механічна швидкість на 5%, а при турбінному – проходка на 37%, механічна швидкість на 28%, а стійкість долота не змінилася.

Раціональна витрата очисного агента повинна забезпечувати найкращі результати буріння в даних геолого-технічних умовах [1]. Нині використовуються такі критерії для визначення мінімальної витрати промивальної рідини: величина швидкості висхідного потоку, питома витрата на одиницю діаметру долота; конкретні значення витрати для кожного типу і розміру породоруйнівного інструменту і властивостей порід. Крім того, на практиці використовують рекомендації зі швидкості висхідного потоку промивальної рідини (табл. 4).

Таблиця 4

Рекомендовані швидкості висхідного потоку

Породоруйнівний інструмент	Швидкість висхідного потоку при промиванні, м/с	
	водою або розчинами ПАР	глинистим розчином
Долота різального типу	0,6 – 1,0	0,6 – 0,8
Шарошкові долота	0,6 – 0,8	0,4 – 0,6

Швидкість винесення часток $V_{\text{ч}}$ повинна забезпечити достатню чистоту кільцевого простору стовбура свердловини, яка залежить від припустимого збагачення об'єму промивальної рідини в кільцевому просторі свердловини частками твердого тіла, що у свою чергу залежить від механічної швидкості буріння. Тому цю величину слід визначати за формулою

$$V_{\text{ч}} = \frac{f_3 V_M (\rho - \rho_p)}{f_{\text{кп}} \lambda (\rho_{\text{кп}} - \rho)}, \quad (4)$$

де f_3 і $f_{\text{кп}}$ – площі перерізу забою і кільцевого простору між стінками свердловини і бурильними трубами відповідно; V_M – механічна швидкість буріння; λ – коефіцієнт, що враховує гвинтоподібний рух часток у висхідному потоці в процесі буріння; ρ – щільність часток зруйнованої породи; $\rho_{\text{кп}}$ – густина промивальної рідини в кільцевому просторі.

Згідно з рекомендаціями [2], різниця густини низхідного і висхідного потоку очисного агента не повинна перевищувати 10 кг/м^3 для води, а для глинистого розчину вона знаходиться в межах $20 - 30 \text{ кг/м}^3$.

При проектуванні режиму промивання також широко використовують рекомендовані значення питомої витрати промивальної рідини на 1 мм діаметру породоруйнівного інструменту. Необхідну подачу насоса в цьому випадку визначають з наступного співвідношення

$$Q = q_n D, \quad (5)$$

де q_n – питома витрата рідини на 1 мм діаметру породоруйнівного інструменту; D – діаметр породоруйнівного інструменту.

У табл. 5 приведені результати розрахунку $V_{\text{ч}}$ для свердловини одноколонної конструкції, буримої із застосуванням шарошкового долота діаметром $190,5 \text{ мм}$. Значення ρ приймається рівним 2500 кг/м^3 , густина глинистого розчину складає 1200 кг/м^3 .

Таблиця 5

Результати розрахунку швидкості винесення шламу для свердловини одноколонної конструкції (з промиванням водою і глинистим розчином), м/с

Тип промивальної рідини	Категорія порід за твердістю											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Вода або розчин ПАР	1,52	0,74	0,45	0,25	0,17	0,12	0,11	0,09	0,056	0,035	0,023	0,012
Глинистий розчин	0,53	0,26	0,16	0,09	0,06	0,04	0,038	0,031	0,019	0,012	0,008	0,004

Наведені в табл. 5 дані свідчать про те, що рекомендовані початкові дані для розрахунку $V_{\text{ч}}$ не відповідають практиці. Так, наприклад, при бурінні в породах VIII категорії за твердістю і промиванні водою, швидкість винесення часток шламу на поверхню складає $0,09 \text{ м/с}$. При цій швидкості винесення, шлам, при глибині свердловини 1000 м , почне поступати на поверхню тільки після трьох годин після початку буріння. Розрахункова швидкість винесення часток шламу знижується із зростанням категорії породи за твердістю. Значення $V_{\text{ч}}$ при бурінні з промиванням водою дещо вищі, ніж при промиванні глинистим розчином. Таким чином, для забезпечення якісних умов очищення забою свердловини, і особливо у разі підвищеного ступеняшламоутворення (це явище спостерігається при бурінні схильних до осипів порід), продуктивність насосів необхідно визначати виключно з умов дотримання необхідних висхідних швидкостей потоку промивальної рідини.

Рідина, в якій відбуваються процеси деформування і руйнування твердого тіла, може активно брати участь в цих процесах, полегшуючи і прискорюючи їх. У процесах механічного руйнування твердого тіла під впливом зовнішніх зусиль,

переданих тілу якимось інструментом, в деформованих його шарах, прилеглих до поверхні руйнування, утворюються зона передруйнування та область підвищеної тріщинуватості. У зародок мікротріщини цієї зони проникає зовнішнє середовище, тобто рідина змочує дане тверде тіло. Підвищуючи молекулярну спорідненість цієї рідини до поверхні твердого тіла, можна значно полегшити процеси його деформування і руйнування, викликаючи розм'якшення твердого тіла в зоні пружних або пластичних деформацій і таким чином викликати зниження твердості або міцності тіла, що деформується, під впливом проникнення рідини в зону передруйнування.

При взаємодії промивальної рідини, обробленої, наприклад, електрохімічним методом, і твердих гірських порід, відбувається зниження величини навантаження, за якого проходить руйнування породи, з одночасним зменшенням величини питомої об'ємної роботи руйнування. На нашу думку це досягається за рахунок ефекту адсорбційного зниження міцності твердих тіл. Згідно з енергетичним трактуванням, ефект знеміцнення характеризується зниженням роботи на утворення нових поверхонь в твердому тілі в процесі деформації і руйнування під впливом формування на них адсорбційного шару. За силовим трактуванням, розповсюдження адсорбційного шару по поверхні дефекту (мікротріщини), що інтенсивно розвивається, пов'язане з виникненням розсувного зусилля [4].

Адсорбційне зниження твердості відбувається внаслідок підвищення спорідненості породи, яка піддається руйнуванню, та промивальної рідини. Це проявляється в інтенсивному зв'язуванні водних (гідратних) оболонок на внутрішній поверхні мікрощілин або їх устях. Утворення водних оболонок на поверхнях твердого тіла і зміна їх товщини може відбуватися при зміні концентрації позитивно або негативно заряджених іонів (іони водню H^+ та гідроксиду OH^-), які можуть адсорбуватися на поверхні твердого тіла з утворенням так званого подвійного електричного шару. Такий шар складається з двох частин: адсорбційного шару, пов'язаного з поверхнею, і рухомого – дифузного шару. У адсорбційний шар входять іони даного знака – негативні іони (аніони) або позитивні іони (катіони) і частина протилежно заряджених іонів – противоіони. Решта надлишкових противоіонів, необхідних для дотримання загальної електронейтральності, утворюють дифузний шар (іонну атмосферу), щільність якої поступово зменшується з віддаленням від поверхні.

В процесі буріння, при взаємодії гірських порід і електрохімічно обробленої промивальної рідини з високим значенням рН, відбувається адсорбція негативно заряджених іонів гідроксиду на поверхні стінок свердловини і поверхні її вибою. При цьому, так як при руйнуванні вибою відбувається утворення нових поверхонь, то і адсорбція OH^- відповідно здійснюється більш інтенсивно. Також аніони адсорбуються на утворених частинках шламу. Все це призводить до зниження концентрації іонів гідроксиду і, як наслідок, зменшення рівня значення рН промивальної рідини. Тому необхідно підтримувати кількість іонів OH^- на певному початковому рівні за допомогою повторної проточної катодної обробки бурового розчину в електроактиваторах.

Є підстави вважати, що зниження твердості гірських порід при бурінні з використанням електрохімічно обробленої промивальної рідини, пов'язано зі зменшеними значеннями поверхневого натягу останньої. Це узгоджується з ефектом адсорбційного зниження міцності твердих тіл – ефектом П.О. Ребіндера. При цьому енергія змочування на одиницю змоченою поверхні тим більше, чим більше фізико-хімічна спорідненість тіла, яке піддається руйнуванню, до рідини.

Характерні залежності величини навантаження, при якому відбувається крихке руйнування породи і питомої об'ємної роботи руйнування представлені на рис. 1.

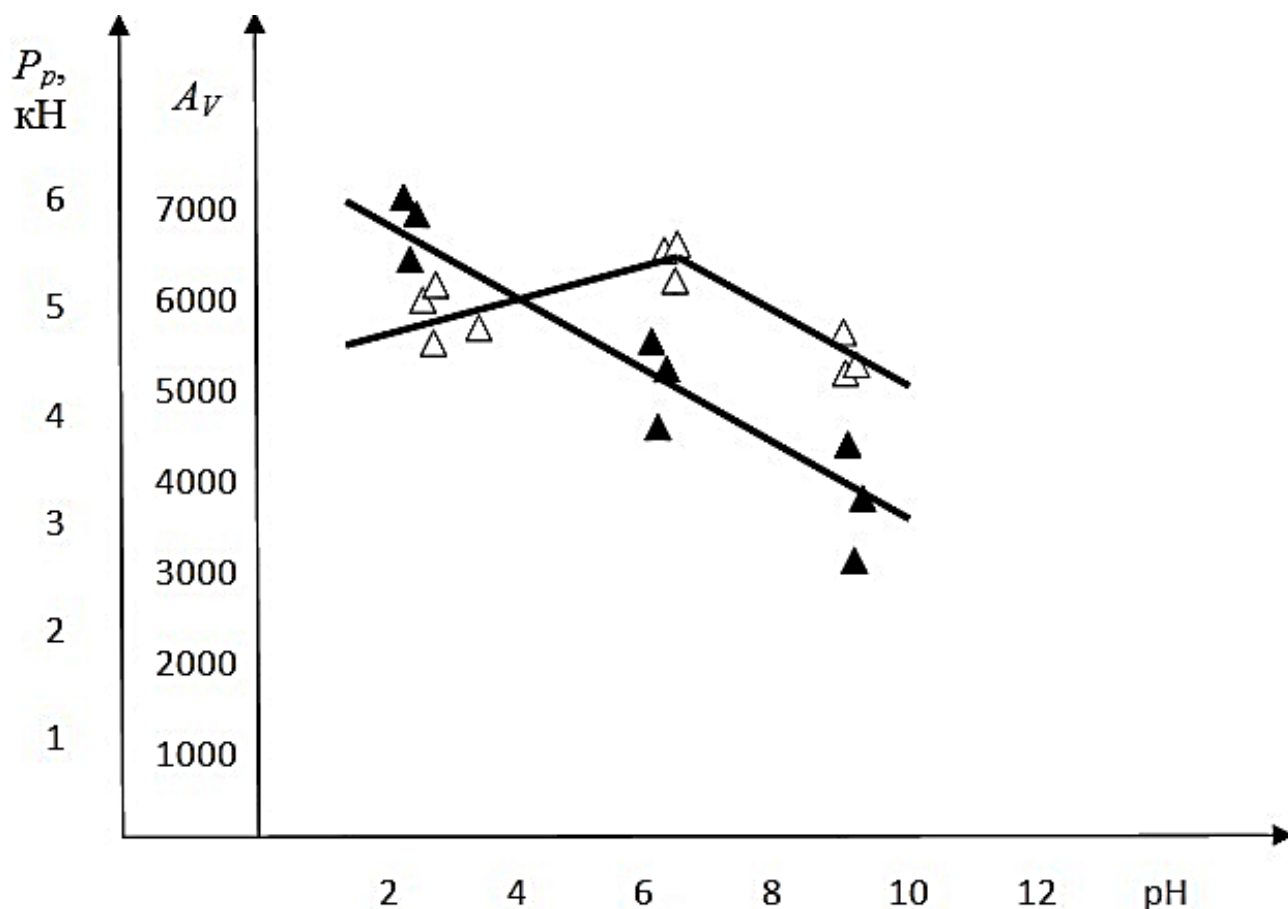


Рис. 1. Залежність енергоємності руйнування (A_V) і величини навантаження (P_p), при якому відбувається крихке руйнування граніту від величини водневого показника рідини при проведенні експериментів на установці УМГП – 3;
 а) Δ – навантаження, при якому відбувається крихке руйнування граніту;
 б) \blacktriangle – об'ємна робота руйнування

Енергія змочування і є кількісною мірою цієї спорідненості, тобто мірою здатності даної рідини насичувати вільні молекулярні сили на заново утворених поверхнях в твердому тілі. Ця величина енергії змочування залежить від молекулярної природи, як твердого тіла (гірської породи), так і промивальної (а в іншому трактуванні – технологічної) рідини.

Однією з основних умов зниження вартості проводки свердловин із застосуванням очисних агентів зниженої густини є правильний розрахунок і вибір оптимальних витрат рідкої і газової фаз суміші і визначення при цьому тисків, що потрібні для створення і підтримки циркуляції її у свердловині. Перша умова є основою ефективного проходження зон поглинань і досягнення високих технічних показників, а друга визначає можливість використання компресорів з певними параметрами (за продуктивністю і робочому тиску) і їх кількість.

Здатність розчинів утворювати газорідні суміші або піни визначається особливими властивостями молекул розчинених речовин, які відносяться до класу поверхнево-активних (ПАР).

Нині, у зв'язку з відсутністю чітких критеріїв прогнозованості піноутворюючих властивостей ПАР і їх поведінки в тому або іншому середовищі, при проектуванні технології буріння з використанням газорідних сумішей рекомендується керуватися довідковими даними. У них пропонується значний ряд рецептур приготування пінних очисних агентів, відповідних певним гірничо-геологічним і техніко-технологічним умовам. Багатогранність вирішуваних завдань зумовила необхідність створення композиційних складів ПАР-піноутворювачів і допоміжних речовин; при цьому призначення кожного їх компонента різне і зводиться до наступного: отримання стійкої піни, регулювання складу робочого середовища, обумовленого, в першу чергу, певною мінералізацією, і, нарешті, нейтралізація дії водневого показника.

Композиційні складі ПАР-піноутворювачів і допоміжних речовин дають газорідні суміші досить високої стабільності, що повністю виключає їх швидке саморуйнування і призводить до необхідності застосування технологічного устаткування для піноруйнування. Крім того, наявність у складі газорідних сумішей декількох реагентів вносить значні корективи (не завжди позитивні) до вибійних процесів руйнування гірських порід, обумовлені фізико-хімічною взаємодією на межі розділу фаз. Таким чином, виникає питання про необхідність заміни чисто хімічних способів регулювання властивостей робочого середовища на фізико-хімічні, які дозволяють змінювати параметри останнього за допомогою дії електричних полів, що в нашому випадку виражається в електрохімічній обробці. В результаті такої дії рідина переходить в метастабільний (активований) стан, який характеризується аномальними значеннями фізико-хімічних параметрів, у тому числі окислювально-відновного потенціалу, пов'язаного з активністю електронів у воді, електропровідності, рН, поверхневого натягнення і інших параметрів та властивостей.

Згідно технологічного ланцюжка (рис. 2) оброблювана рідина, що містить ту або іншу ПАР, поступає по подаючій лінії в піногенератор (рис. 3), а саме в ніпель спеціального перерізу 1 і, обтікаючи конус 2, поступає у викидну лінію. При обтіканні конуса 2 відбувається утворення ділянки, в якій краплинна рідина повністю відсутня – з'являється суперкаверна, що сприяє зниженню тиску, і, як наслідок, підсосу повітря через отвори 5. Для забезпечення можливості регулювання режимними параметрами роботи кавітаційного диспергатора, конус обті-

кання 2 виконаний з можливістю осьового переміщення в дифузори ніпеля 1 шляхом переміщення штока 3. При цьому розмір суперкаверни залежатиме від швидкості набігаючого потоку і як наслідок від радіального проміжку між конусом обтікання і дифузори ніпеля 1.

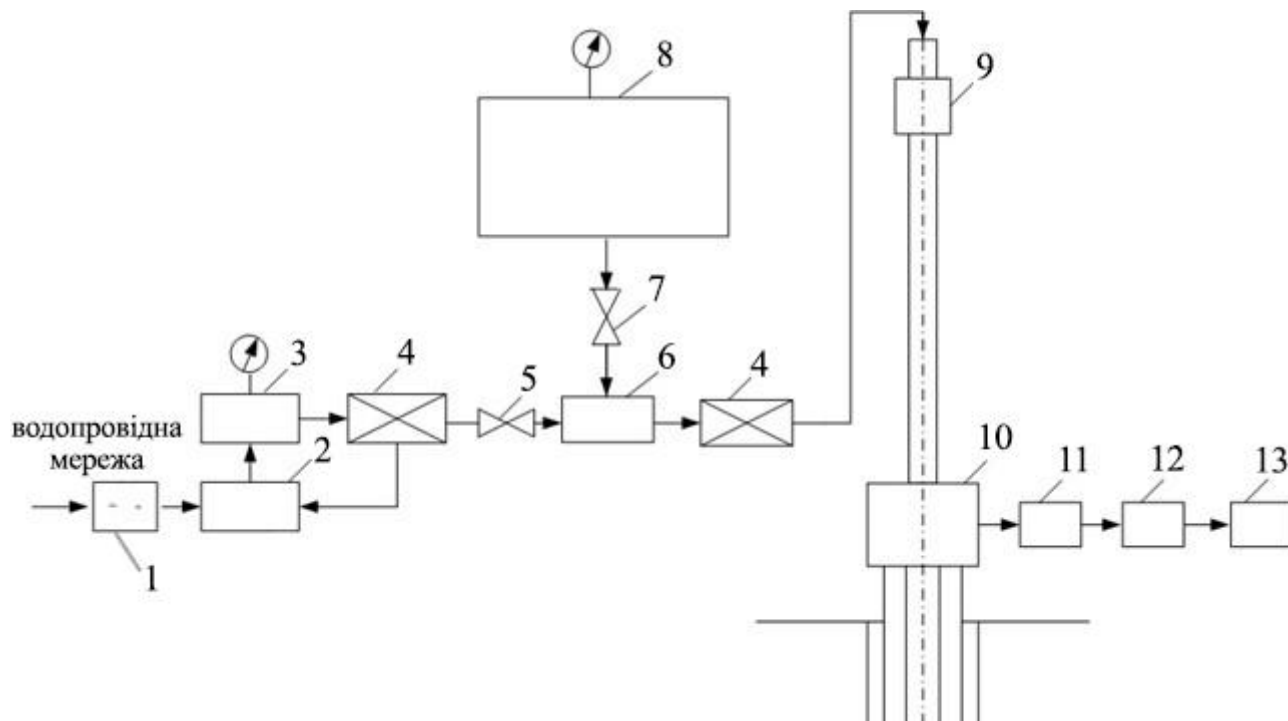


Рис. 2. Технологічна схема циркуляції газорідної суміші на буровій:
 1 – електроактиватор; 2 – ємність з розчином ПАР; 3 – дозуючий насос;
 4 – триходовий кран; 5 – запобіжний клапан; 6 – кавітаційний піногенератор;
 7 – вентиль; 8 – компресор; 9 – вертлюг-сальник; 10 – герметизатор;
 11 – піногасник; 12 – шламозбірник; 13 – місткість-відстійник

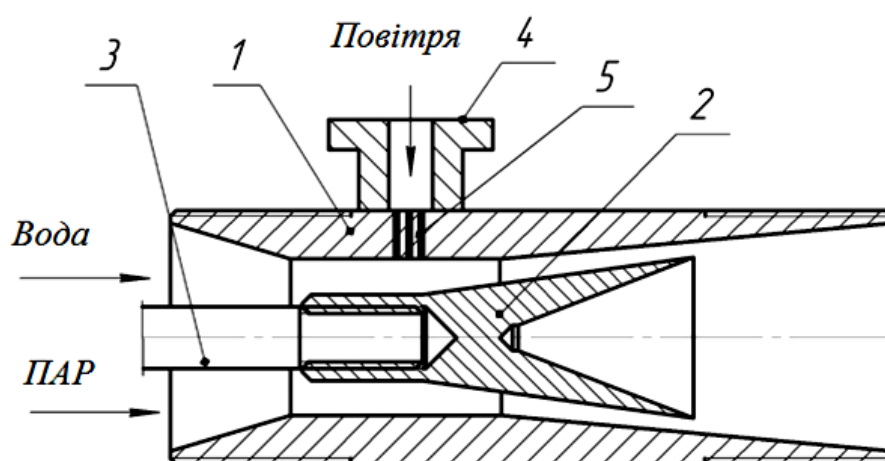


Рис. 3. Кавітаційний піногенератор

Конус обтікання 2 виконаний порожнистим для збільшення об'єму утвореної суперкаверни, що у свою чергу тягне збільшення кількості мікробульбашок (оскільки мікробульбашки утворюються по усій поверхні каверни кавітації).

Таким чином, в нагнітальну лінію поступає суміш, що складається з великих бульбашок повітря і відносно дрібних, що містять в собі інші гази і їх суміші (O_2 , Cl_2 , CO_2 , H_2 , N_2 , SO_2 , NO_2). При контакті бульбашок газу, що знаходяться в отриманій суміші, з частинками шламу відбувається процес адсорбції, який супроводжується зміною поверхневої енергії останнього. Зниження поверхневої енергії частинок бурового шламу супроводжується збільшенням ефективності змочування і виносної здатності очисного агента.

Окрім описаної вище технології отримання газорідних сумішей, фахівцями кафедри нафтогазової інженерії та буріння НТУ «ДП» пропонується наступний варіант: насичення газом дисперсних систем на водній основі здійснюється воднем, що утворюється при взаємодії дисперсної системи з елементами бурового снаряда, виготовленими з енергоакумулюючого сплаву (натрію, магнію і алюмінію), і розташованих в безпосередній близькості із вибоєм свердловини.

Висновки. У статті розглянуті особливості циркуляційних процесів при бурінні свердловин і їх фізико-хімічні аспекти. В якості пріоритетного напрямку розвитку технології спорудження свердловин обрані методики визначення рецептур високоякісних промивних рідин і проектування досконалої технології їх застосування в поєднанні з сучасним обладнанням і інструментом. Встановлено, що промивальні рідини можуть сприяти зниженню ефективної поверхневої енергії, а також визначено наступне – активовані бурові агенти справляють істотний вплив на енергетичні показники руйнування гірських порід. Показано, що інтенсифікаторами проникнення промивальних рідин в зону передруйнування можуть бути сили хімічної взаємодії, адсорбційні явища, а також зовнішні механічні дії. Проведено аналіз взаємодії газорідних сумішей з продуктами руйнування при бурінні свердловин. Запропоновано метод розгляду процесів, що протікають в свердловині при застосуванні зазначеної технології. Обґрунтовано методику розрахунку і параметричний ряд інструментів і пристроїв для буріння свердловин із застосуванням газорідних сумішей стосовно до різноманітних гірничо-геологічних умов. Розглянуті питання проектування досконалої гідравлічної програми приготування, циркуляції та очистки промивальної рідини, що забезпечить досягнення високих техніко-економічних показників процесу спорудження та освоєння нафтогазових свердловин.

Перелік посилань

1. Коровяка, Є.А., & Ігнатов, А.О. (2020). *Прогресивні технології спорудження свердловин*. Дніпро: НТУ «ДП».
2. Давиденко, А.Н., Ігнатов, А.А., & Полищук, П.П. (2016). *Транспортування продуктів руйнування при бурінні скважин*. Дніпропетровськ: Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т».
3. Ihnatov, A. O., Koroviaka, Y. A., Pinka, J., Rastsvietaiev, V. O., & Dmytruk, O. O. (2021). Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 11–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/011>
4. Павличенко, А.В., Коровяка, Є.А., Ігнатов, А.О., & Давиденко, О.М. (2021). *Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин*. Дніпро: Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка».
5. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos publishing.

6. Ihnatov, A.O., & Stavychnyi, Ye.M. (2020). Laboratorni ta promyslovi doslidzhennia protsesu tsementuvannia naftohazovykh sverdlovykh v umovakh tovshch osadovykh porid [Laboratory and industrial research of cementation process of oil-and-gas bore holes in the conditions of sedimentary rock beds]. *Instrumentalne materialoznavstvo - Tooling materials science*, 23, 88 – 103.
7. Davidenko, A., & Ighnatov, A. (2016). Basic results of researches of lining and plugging processes at wells construction. *Metallurgical and Mining Industry*, 9, 58 – 64.
8. Curry, G.L. & Feldman, R.M. (2012). *Manufacturing systems. Modeling and analysis*. Springer.
9. Войтенко, В., & Вітрик, В. (2012). *Технологія і техніка буріння*. Київ: Центр Європи.
10. Hossain, M.E., & Islam, M.R. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Scrivener publishing.
11. Hossain, M.E. (2016). *Fundamentals of drilling engineering*. Scrivener publishing.
12. Білецький, В.С., Орловський, В.М., & Вітрик, В.Г. (2018). *Основи нафтогазової інженерії*. АСМІ.

АННОТАЦІЯ

Цель. Обоснование параметров прогрессивной комплексной гидравлической программы очистки забоя и ствола строящейся скважины, базирующихся на методах изучения физико-химического взаимодействия буровой промывочной жидкости (газожидкостной смеси) с продуктами разрушения горного массива.

Методика исследования. Аналитические и лабораторные исследования особенностей создания и реализации прогрессивной комплексной гидравлической программы очистки забоя и ствола строящейся скважины выполнены с применением современных методов аналитического анализа и экспериментальных исследований, в частности путем использования общих принципов математического и физического моделирования, методик обработки результатов исследований в среде EXCEL, MATHCAD, измерительных приборов и материалов. Протекание буровых циркуляционных процессов моделировалось на экспериментальных скважинах учебного бурового полигона Национального технического университета «Днепровская политехника» с применением буровой установки УКБ-4П и соответствующего вспомогательного инструмента и оборудования.

Результаты исследования. Рассмотрены ключевые вопросы усовершенствования способа бурения с применением очистных агентов нормальной и пониженной плотности. Изучены особенности физико-химических взаимодействий на границе раздела фаз в системе «очистной агент - горная порода». Приведены базовые сведения по основным конструктивно-технологическим особенностям отдельных узлов цепочки получения очистных агентов пониженной плотности. Убедительно доказана необходимость тщательного подхода к процессу регулирования значения уровня рН очистных агентов на основе геолого-технических условий проведения буровых работ и целевого назначения скважин. Промывочную жидкость, обработанную постоянным электрическим током и приобретшую определенные значения водородного показателя рН, можно применять с целью повышения технико-экономических показателей бурения скважин.

Научная новизна. Максимальная эффективность поверхностно-активных веществ, как неперменного компонента буровой промывочной жидкости (газожидкостной смеси), определяется активностью их полярных молекул, причем введение в состав промывочной жидкости поверхностно-активных веществ обеспечивает значительное уменьшение энергозатрат на реализацию совершенного процесса сооружения буровой скважины.

Практическое значение. Логически и последовательно рассмотрены вопросы влияния параметров очистного агента на забойные процессы разрушения пород; взаимосвязи между физико-геометрическими характеристиками продуктов разрушения и циркуляционными процессами на забое и в стволе скважины; особенностей схемы циркуляции очистного агента, связанные с разнообразием геолого-технических факторов.

Ключевые слова: буровая промывочная жидкость, сооружение скважин, поверхностно-активное вещество, горная порода, продукты разрушения, шлам, гидравлическая программа очистки, кавитация, активированная жидкость, устройство.

ABSTRACT

Purpose. Substantiation of the parameters of a progressive complex hydraulic program for cleaning the bottomhole and the wellbore under construction, based on methods for studying the physical and chemical interaction of drilling fluid (gas-liquid mixture) with rock mass destruction products.

Research methodology. Analytical and laboratory studies of the features of the creation and implementation of a progressive integrated hydraulic program for cleaning the bottomhole and the wellbore of a well under construction were carried out using modern methods of analytical analysis and experimental research, in particular by using the general principles of mathematical and physical modeling, methods for processing research results in the EXCEL, MATHCAD, measuring instruments and materials. The flow of drilling circulation processes was modeled on experimental wells of the training drilling site of the Dnipro University of Technology using the UKB-4P drilling rig and the corresponding auxiliary tools and equipment.

Research results. The key issues of improving the method of drilling with the use of cleaning agents of normal and low density are considered. The features of physico-chemical interactions at the phase boundary in the system “cleaning agent - rock” are studied. Basic information on the main design and technological features of individual nodes in the chain for obtaining low-density cleaning agents is given. The need for a thorough approach to the process of regulating the pH level of cleaning agents based on the geological and technical conditions of drilling operations and the purpose of the wells has been convincingly proven. The flushing liquid treated with direct electric current and having acquired certain values of the pH value can be used to improve the technical and economic indicators of well drilling.

Originality. The maximum efficiency of surfactants, as an indispensable component of the drilling fluid (gas-liquid mixture), is determined by the activity of their polar molecules, and the introduction of surfactants into the composition of the drilling fluid provides a significant reduction in energy costs for the implementation of a perfect well construction process.

Practical implications. Logically and sequentially, the issues of the influence of the parameters of the cleaning agent on the downhole processes of rock destruction are considered; the relationship between the physical and geometric characteristics of the destruction products and circulation processes at the bottom and in the wellbore; features of the circulation scheme of the cleaning agent associated with a variety of geological and technical factors.

Keywords: *drilling fluid, well construction, surfactant, rock, destruction products, cuttings, hydraulic cleaning program, cavitation, activated fluid, device.*