

А.О. Ігнатов¹, Є.М. Ставичний², кандидати технічних наук

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: A_3000@i.ua

²ПАТ «Укрнафта», Несторівський пров., 3-5, 04053, Київ, Україна, e-mail: stavichniy@i.ua

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОМИВАННЯ ТА КРІПЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН У СКЛАДНИХ УМОВАХ

Дослідження особливостей споруджування свердловин у складних умовах, зокрема процесів їх промивання і кріплення, виконано із застосуванням сучасних методів аналітичного аналізу й експериментальних досліджень із використанням методів математичного та фізичного моделювання, методик моделювання та обробки результатів досліджень у середовищі SolidWorks, STATGRAPHICS, MATHCAD, контрольно-вимірювальних приладів і відповідних матеріалів.

Лабораторними способами контролю вивчалися технологічні властивості бурових промивальних рідин за допомогою спеціальних приладів лабораторії контролю показників очисних агентів, що є робочою методикою визначення показників гідравлічної програми промивання свердловин.

Проектування композиційного тампонажного матеріалу та стабілізованої буферної суміші проведено із застосуванням методу ортогонального центрально-композиційного планування, що дозволяє зменшити кількість експериментів, впорядкувати пошук оптимальних умов, отримати математичну модель об'єкта дослідження.

Намічено основні напрямки вдосконалення технологічних прийомів і методів циклу промивання і кріплення свердловин в складних геолого-літологічних умовах. В якості пріоритетного напрямку розвитку технології спорудження свердловин обрані методики визначення рецептур високоякісних промивальних рідин, тампонажних систем, а також проектування досконалої технології їх застосування. Обґрунтовано необхідність встановлення фізичної сутності явищ, які відбуваються при реалізації технологій очистки і кріплення свердловин, що в свою чергу дозволить визначати найбільш раціональні параметри процесів спорудження свердловини, тобто максимальну продуктивність при мінімальних витратах. Розроблено та досліджено композиційну розширену тампонажну суміш та стабілізовану буферну суміш, а із застосуванням методу ортогонального центрально-композиційного планування визначено оптимальну кількість модифікуючих добавок у складі зазначених систем.

Отримані результати лабораторних і аналітичних досліджень, а також узагальнення промислових та стендових даних, є базовими для проектування режимних параметрів процесу промивання і тампонування обсадної колони з гарантованим забезпеченням високих техніко-економічних показників. Дані з вивчення особливостей свердловинних циркуляційних процесів та взаємодії із стовбуром свердловини тампонажних систем є вихідними для обґрунтування конструктивних і технологічних параметрів технічного супроводження циклу спорудження свердловин.

Ключові слова: осадові відкладення, каверна, тампонажний розчин, кріплення, умови буріння, водовіддача, цементний камінь, поверхнево-активна речовина, процеси гідратації, свердловина.

Вступ

При спорудженні свердловин застосовують бурові промивальні рідини (БПР), які являють собою складні фізико-хімічні дисперсні системи з сильно розвиненими поверхнями розділу фаз; останні відіграють роль середовища, в якому протікають процеси руйнування гірського масиву [1]. Саме БПР визначають ступінь використання потенційних можливостей і ресурс бурового обладнання (породоруйнівного інструменту), механічну швидкість, ймовірність виникнення різного роду ускладнень тощо. Вибір БПР, що найбільш повно відповідає геолого-технічним умовам, виконують з урахуванням певних вимог, виконання яких забезпечується великою кількістю функцій БПР (наприклад, такі основні: ефективна

очистка вибою від частинок зруйнованих порід і стале видалення їх на денну поверхню; забезпечення охолодження і змащування деталей бурових доліт, вибійних двигунів, бурильної колони тощо; попередження обвалення в стовбур свердловини нестійких гірських порід; передавання потужності від джерела на денній поверхні до вибою при бурінні з гідравлічними вибійними двигунами) [2].

В якості БПР зустрічаються системи різного характеру – від грубодисперсних, наприклад, деяка суспензія, що утворюється в свердловині при бурінні гірських порід з промиванням вибою водою, до тонкодисперсних (колоїдних), прикладом яких можуть служити оброблені хімічними реагентами розчини, а найбільш розповсюдженим з них є глинистий [3]. Проте у більшості випадків промивальні рідини полідисперсні: у складі їх твердої фази знаходяться одночасно як колоїдні, так і грубодисперсні частинки.

Глинисті розчини є ефективними БПР за декількома позиціями, зокрема: вони закріплюють стінки свердловини одночасно з її поглибленням. Застосовують глинисті БПР при бурінні слабозв'язних порід осадового комплексу, а також порушених тріщинами і перем'ятих кристалічних порід [4].

Процес промивання свердловин повинен бути спроектований і реалізований у такий спосіб, щоб досягти найкращих техніко-економічних показників процесу буріння, враховуючи існування необхідності виконання основних технологічних функцій та обмежень.

Наведемо конкретний приклад: споруджування свердловин в розрізах залягання хомогенних пластичних порід пов'язано з вирішенням комплексу задач забезпечення стійкості стінок свердловини, формування номінального стовбура, як визначального фактора успішності проведення кріплення свердловини. Проте, незважаючи на значні напрацювання та розробки в напрямі створення ефективних БПР, розкриття хомогенних відкладів супроводжується значними порушеннями цілісності стовбура свердловин, а також згодом для них спостерігається подальший розвиток деформаційних процесів у масиві гірських порід [5].

Відомо, що ефективність процесу буріння свердловин залежить, насамперед, від якості БПР та, як наслідок, технологічних особливостей запроєктованої гідравлічної програми промивання. На даний час, у зв'язку із зростанням обсягів буріння глибоких свердловин, для підвищення швидкості проходки, зменшення ускладнень при бурінні та збільшення терміну служби породоруйнівного інструменту до БПР пред'являються особливі вимоги, зокрема щодо флотатійної, адсорбційної, охолоджувальної та мастильної здатностей [6].

Нині при розробці нових рецептур БПР для спорудження свердловин в ускладнених умовах рекомендується виходити з наступних основних вимог: малий вміст твердої фази; знижені водовіддача, в'язкість та поверхневий натяг фільтрату розчину; стійкість до дії шлама гірських порід та мінералізації підземних вод; сумісність різних хімічних реагентів у даній БПР [7].

Цілою низкою ґрунтовних досліджень доведено, що ефективність основних операцій бурового циклу в значній мірі залежить від способу і режиму циркуляції, а також властивостей БПР, вибір типу яких визначається технологічними й екологічними вимогами до них, а також гірничо-геологічними умовами буріння [8].

Вивчення досвіду споруджування свердловин різного призначення показує, що високі техніко-економічні показники окремих процесів і всього циклу, в цілому, можуть бути досягнуті тільки при створенні методики вибору високоякісних БПР і досконалої технології їх застосування, в поєднанні з сучасним обладнанням й породоруйнівним інструментом [9].

Також зазначимо існування стійкої тенденції до широкого застосування поверхнево-активних речовин (ПАР) при бурінні свердловин, як одного з найбільш перспективних наукових і практичних напрямів у цій області [4].

Що стосується проблематики підвищення якості кріплення свердловин, то тут вирішення питань бачиться, насамперед, у застосуванні високоякісних тампонажних матеріалів та буферних систем – визначальних чинників створення надійного ізоляційного

кільця, порушення якого негативно впливають на техніко-економічні показники буріння, а роботи з їх ліквідації є здебільшого довготривалими та низькоефективними [10].

Аналіз літературних та виробничих даних показує: порушення цілісності стовбура свердловини, що в подальшому провокує деформацію обсадних колон у хемогенних відкладах, є доволі поширеним, найбільш проблемним видом ускладнення під час споруджування та експлуатації свердловин [11].

Зазначимо наступне: виробничий цикл спорудження свердловин різного призначення складається з великої кількості трудомістких, енергоємних, складних і фінансово витратних процесів: руйнування гірської породи на вибої; видалення зруйнованої породи з-під торця породоруйнівного інструменту і транспортування її на поверхню; підтримки стінок свердловини в стійкому стані. Для всіх перелічених компонент визначальним чинником їх досконалого виконання є застосування таких БПР, які б забезпечували найповнішу реалізацію покладених на них функцій [12].

Значне розширення асортименту БПР, що застосовуються при бурінні свердловин, обумовлює необхідність проведення глибоких і всебічних досліджень з вивчення фізико-хімічних явищ, які спостерігаються при створенні, приготуванні і застосуванні БПР, і їх впливу як на окремі процеси, так і на весь цикл буріння свердловини, особливо його екологічної складової. Вирішення цієї актуальної наукової проблеми має важливе народногосподарське значення [13].

Іноді прагнення належного виконання усього процесу промивки бурової свердловини призводить до невиконання сформульованих обмежень; тут необхідне комплексне вирішення оптимізаційного завдання, мета якого полягає у виборі для кожного конкретного випадку економічно найвигіднішого поєднання технологічних показників процесу промивання, що в перспективі забезпечують раціональну вартість свердловини та досягнення поставленої мети спорудження свердловини за збереження високої її якості [4].

На виникнення порушення цілісності обсадних колон в інтервалах залягання хемогенних відкладів, окрім геологічної будови, впливають: міцнісні характеристики використаних обсадних труб, конфігурація стовбура свердловини, тривалість періоду від моменту розкриття пластичних порід до завершення кріплення, якість цементування, тектонічні особливості району робіт та ряд інших чинників; саме тому проблема якісного кріплення хемогенних відкладів, що передує розкриттю нижчерозташованих покладів вуглеводнів, залишається актуальною і потребує вирішення комплексу завдань для забезпечення якісного кріплення свердловини на весь період експлуатації [14].

Міцність системи кріплення залежить від фізико-механічних і геометричних характеристик обсадних труб і цементного кільця, видозмінюючи які, можна проектувати і формувати оптимальні конструкції, здатні працювати в зоні пружних деформацій. Перспективним напрямком для вирішення зазначеної проблеми є застосування висоефективних композиційних тампонажних систем у поєднанні з інноваційними технологічними рішеннями, які б у комплексі забезпечили надійне та довговічне кріплення свердловини.

Мета статті – теоретичне і лабораторне вивчення й аналіз базових умов забезпечення надійності процесів промивання та кріплення свердловин за наявності складних геолого-літологічних умов, на прикладі конкретних виробничих даних, шляхом розроблення та впровадження інноваційних техніко-технологічних прийомів і методів.

Методика досліджень

Дослідження особливостей споруджування свердловин у складних умовах, зокрема процесів їх промивання і кріплення, виконано із застосуванням сучасних методів аналітичного аналізу й експериментальних досліджень із використанням методів математичного та фізичного моделювання, методик моделювання та обробки результатів досліджень у

середовищі SolidWorks, STATGRAPHICS, MATHCAD, контрольно-вимірювальних приладів і відповідних матеріалів [15].

Лабораторними способами контролю вивчалися технологічні властивості бурових промивальних рідин за допомогою спеціальних приладів лабораторії контролю показників очисних агентів, що є робочою методикою визначення показників гідравлічної програми промивання свердловин.

Проектування композиційного тампонажного матеріалу та стабілізованої буферної суміші проведено із застосуванням методу ортогонального центрально-композиційного планування, що дозволяє зменшити кількість експериментів, впорядкувати пошук оптимальних умов, отримати математичну модель об'єкта дослідження.

Процес розв'язання задач оптимального планування експерименту поділяється на такі етапи: складання моделі, що планується; підготовка необхідних вихідних даних; розрахунок моделі; отримання результатів [16]. Суть планування експериментів полягає у встановленні математичної залежності між заданими властивостями і складом, або витратою матеріалів.

Результати досліджень

Практика виконання бурових робіт доводить, що присутність на контакт з гірською породою БПР або її фільтрату викликає фізико-хімічні процеси на межі розділу, а саме: осмотичні явища, поверхневу гідратацію, розчинення, капілярне проникнення тощо [17]. Для деяких порід вони можуть викликати помітну зміну їх агрегатного стану, сил внутрішнього зчеплення і, в підсумку, можуть істотно перетворити властивості гірських порід в пристовбурному просторі свердловини в порівнянні з первинними, що існували в природному заляганні. Найважливішим чинником запобігання обвалам порід та інтенсивному каверноутворенню, як відомо, є правильний вибір БПР та її компонентного складу. Раніше існувала думка, що на обвали нестійких глинистих порід впливає лише величина водовіддачі БПР. Проте практика буріння з БПР різних композицій показала, що стійкість самодиспергуючих порід (глин, глинистих сланців, аргілітів тощо) залежить також і від складу фільтрату БПР [18].

Фахівцями-науковцями НТУ «Дніпровська політехніка» та ПАТ «Укрнафта» запропоновано та широко випробувано різні рецептури БПР, призначених для спорудження свердловин в нестійких гірських породах. Основою досліджень слугували ґрунтовні лабораторно-промислові відомості щодо наступних типів БПР [4].

Хлоркальцієві розчини – це БПР, що містять в якості основного активного реагенту хлористий кальцій (CaCl_2); хімічна дія таких розчинів визначається, головним чином, здатністю іонів кальцію вступати у взаємодію з породами глинистого комплексу і викликати їх коагуляцію, в результаті чого підвищується зв'язність і знижується набряклість порід. Процес цей носить об'ємний характер і супроводжується утворенням конденсаційно-кристалізаційних структур, які зміцнюють стінки свердловини. При взаємодії іонів кальцію хлоркальцієвого розчину з глинистими породами має значення також і швидкість їх адсорбції. Чим швидше адсорбуються іони кальцію, тим швидше настає коагуляційне зміцнення глинистих порід. Швидкість адсорбції зростає при підвищенні рН розчину, тому обов'язковим компонентом високоякісних хлоркальцієвих розчинів є вапно.

БПР на основі ФХЛС (ферумхромлігносульфонат) – в хімічному відношенні ФХЛС являє собою полімер нерегулярної будови [19], в якому хром і залізо знаходяться в тривалентному стані, а також є пов'язаними в макромолекулі лігносульфоната у вигляді складних комплексів.

На основі ФХЛС розроблена рецептура БПР і досліджено її основні технологічні властивості (табл. 1).

Таблиця 1. Компонентний склад розроблених БПР та їх основні технологічні показники

№ з/п	Технологічний показник досліджуваної БПР	Одиниця вимірювання	Склад БПР, у %	
			ФХЛС - 2% рідке скло (силікат натрію – 2%, сульфатне мило – 1,5%, вода – інше)	ФХЛС - 4% рідке скло (силікат натрію – 3%, сульфатне мило – 2%, вода – інше)
1	Питома вага (за АГ-ЗПП)	кг/м ³	1050	1050
2	Умовна в'язкість (за СПВ-5)	с	15	16
3	Водовіддача (за ВМ-6)	см ³ за 30 хв.	7	4
4	Товщина фільтраційної кірки	мм	відсутня	відсутня
5	Статична напруга зсуву (за СНС-2)	мГс/см ²	0	0

Лабораторні дослідження стійкості зразків, виготовлених з керна аргілітів і алевролітів, в розроблених БПР дали хороші результати; зразки не розмокали більш ніж після 48 годин витримки у відповідних розчинах, в той час як у воді – протягом 30 хв. Крім того, БПР, оброблені ФХЛС, є стійкими по відношенню до солей кальцію та інших полівалентних металів.

БПР на основі поліакрилів, а саме ГПАНу (ГПАН – гідролізований поліакрилонітрил), який є продуктом омилення поліакрилонітрилу каустиком. Акрилові полімери дозволяють створювати безглинисті БПР з низькою водовіддачею і необхідними структурно-механічними властивостями. Основними недоліками таких БПР є висока вартість і чутливість до солей кальцію та інших полівалентних металів. Нами, для зниження вартості БПР і отримання необхідних властивостей, в якості акрилового полімеру був узятий ГПАН, а для зниження його витрати в БПР уведена глина і ВЛР (вуглелужний реагент). Встановлено, що при спільній хімічній обробці БПР ГПАНом і ВЛР проявляється синергетичний ефект і досягається вищий ступінь стабілізації. Це особливо важливо при наявності жорстких вод. В результаті лабораторних досліджень рекомендований наступний склад БПР (табл. 2).

Таблиця 2. Рецептатура та основні технологічні властивості БПР на основі ГПАНу

№ з/п	Технологічний показник досліджуваної БПР	Одиниця вимірювання	Склад БПР, у % глина 3 - 5%; ГПАН (10% розчин) 0,2 - 0,5%; ВЛР 1 - 2%; вода – інше
1	Питома вага (за АГ-ЗПП)	кг/м ³	1020 - 1050
2	Умовна в'язкість (за СПВ-5)	с	25
3	Водовіддача (за ВМ-6)	см ³ за 30 хв.	6 - 5
4	Товщина фільтраційної кірки	мм	менш 1 мм
5	Статична напруга зсуву (за СНС-2)	мГс/см ²	$\theta_1=4,23$; $\theta_{10}=4,55$

З урахуванням викладеного вище, у виробничих умовах встановлено, що для обробки 1 м³ глинистого розчину умовною в'язкістю 25 с необхідно 0,5 м³ ВЛР и 0,05 - 0,07 м³ ГПАНу. Це дозволяє отримати БПР з технологічними параметрами, близькими до зазначених в табл. 2.

Узагальнено БПР, що застосовуються при бурінні свердловин різного призначення, повинні відповідати таким додатковим вимогам: мати низький поверхневий натяг і хороші мастильні властивості; знижувати гідравлічні опори; попереджати обвали та осипання стінок свердловини та не утворювати рихлу кірку глинистого матеріалу на її стінках [12].

Застосування БПР з поліпшеними мастильними властивостями в процесах при бурінні (а технологічних – при закінчуванні і експлуатації) свердловин неможливо без попередніх лабораторних досліджень наслідків прояву некерованості таких факторів, обумовлюючих рух рідин, як неоднорідність гірських порід, коливання бурового інструменту і багатьох інших.

Відмітною властивістю поверхнево-активних антифрикційних добавок (ПААД) є те, що, сприяючи збільшенню швидкості буріння, вони одночасно збільшують стійкість породоруйнівного інструменту, зменшують рівні вібрації і потужності, що витрачається на подолання сил опорів тертя колони бурильних труб у свердловині. Останній фактор важливий тим, що дозволяє підвищити механічну швидкість буріння шляхом збільшення енергії, яка підводиться до вибою свердловини, та зниження енергоємності руйнування гірських порід.

Для підвищення механічної швидкості буріння необхідно прагнути до зниження поверхневого натягу БПР. З цією метою проведено дослідження поверхневого натягу водних розчинів ПААД (табл. 3).

Таблиця 3. Поверхневий натяг розчинів ПААД, розчинних у воді

№ з/п	Досліджувана речовина (ПАР)	Поверхневий натяг (мДж/м ²) при концентрації, %				
		0,125	0,25	0,5	1,0	2,0
1	«Прогрес»	42,8	36,2	31,7	30,4	30,4
2	Сульфол	34,2	30,8	30,4	29,6	29,6
3	Диталан	42,3	38,2	36,6	35,0	35,0
4	КАУФЕ	40,3	37,6	36,3	36,3	36,3
5	ОП-7	44,8	40,4	38,2	36,8	36,8
6	ОП-10	44,2	40,6	37,8	34,5	34,5
7	Катапін	45,0	38,9	37,8	37,8	37,8
8	Превацел	36,8	32,4	31,6	31,6	31,6
9	Милонафт	43,2	36,4	34,2	33,7	33,7
10	Сульфонат	42,5	38,4	34,8	34,6	34,6
11	Метаупон	48,3	42,4	38,6	35,8	35,8
12	Синтанон	47,8	46,4	43,5	38,7	38,7
13	Синтанол	38,5	34,5	33,3	32,0	32,0
14	ДНСК	58,0	36,7	32,1	32,1	32,1
15	Моноетаноламід	44,5	38,9	36,2	35,8	35,8
16	ВЖС	36,8	34,2	30,8	30,2	30,2
17	Соапсток	44,8	35,6	32,8	32,0	32,0
18	Сульфатне мило	47,4	43,0	34,2	31,8	30,8

Поверхневий натяг вимірювали сталагмометричним способом, як найпростішим і досить точним. Перед початком вимірювань було проведено калібрування приладу, для чого сталагмометр закріплювали вертикально на жорсткому штативі, визначали температуру рідини, здійснювали не менше п'яти вимірів числа крапель і знаходили середнє арифметичне.

У процесі досліджень вимірювали поверхневий натяг як водних розчинів ПААД, так і фільтратів різних типів БПР (глинистих, силікатних, силікатно-гумінових та ін.). На підставі лабораторних досліджень зроблено висновок, що найбільш ефективними та перспективними є ПААД на основі вищих жирних спиртів (ВЖС). При цьому слід зазначити, що і самі ВЖС можуть бути використані для обробки БПР. Основний недолік ВЖС полягає у слабкій активності гідрофільної групи, через що вони погано розчиняються у воді. Заміна гідроксильної групи на іншу, більш гідрофільну, дозволяє отримати сполуку з високою поверхневою активністю і добре розчинну у воді, наприклад, сульфати жирних спиртів [20].

Враховуючи дорожнечу та дефіцитність ВЖС, перспективним напрямом є обробка БПР сумішами ПААД різних класів: наприклад, неіоногенні речовини з аніонактивними або катіонактивними. Цим досягається підвищення ефективності дії добавки, зниження її вартості, економія компонентів тощо.

У табл. 4 наведені результати лабораторних досліджень впливу БПР на зношування сталевих куль і граничну міцність мастильних плівок (ці дослідження є необхідними для оцінювання механізму зношування бурильних труб при їх обертанні в свердловині). Помилка у визначенні результатів досліджень не перевищувала 5%.

Таблиця 4. **Мастильні властивості промивальних рідин, визначені на чотирьохкульковій машині тертя**

Промивальна рідина			Навантаження зварювання куль, Н	Гранична міцність мастильної плівки, МПа	
Основа	Добавка				
	Найменування	Вміст, %			
1	2	3	4	5	
Технічна вода	-	-	650	455	
Технічна вода	Сульфонол	0,05	1750	120	
		0,10	2150	145	
		0,15	2400	160	
	Катапін	0,10	700	110	
		0,25	1100	120	
		0,50	1300	120	
	ОП-10	0,10	1500	640	
		0,25	1600	750	
		0,50	1650	800	
	Феноксол ВІС-15	0,10	1400	165	
		0,25	2000	300	
		0,50	2400	480	
Технічна вода	Суміш сульфонола та ОП-10 (1:1)	0,10	1800	780	
		0,25	2400	820	
		0,50	2500	850	
	Талове масло	0,50	1800	620	
		1,00	2100	800	
		2,00	2200	850	
	Кістковий жир	0,50	1600	600	
		1,00	2000	800	
		2,00	2100	800	
	Нафта		2,00	700	250

Промивальна рідина		Навантаження зварювання куль, Н	Гранична міцність мастильної плівки, МПа	
Основа	Добавка			
	Найменування	Вміст, %		
		4,00	1000	300
		8,00	1000	350
Глинистий розчин (7% водна суспензія бентонітової глини)	-	-	650	220
Глинистий розчин (6% водна суспензія бентонітової глини)	Сульфонол	0,25	700	240
		0,50	700	240
		1,00	700	240
	Катапін	0,25	650	240
		0,50	700	220
		1,00	700	220
	ОП-10	0,25	1800	820
		0,50	1800	820
		1,00	2000	900
	Феноксол ВІС-15	0,25	1700	800
		0,50	1800	840
		1,00	2100	900
	Суміш сульфонолу та ОП-10 (1:1)	0,25	1900	850
		0,50	2100	950
		1,00	2100	950
	Талове масло	0,50	2000	1620
		1,00	2000	1800
		2,00	2100	2250
	Кістковий жир	0,50	1600	1500
		1,00	2000	1600
		2,00	2000	1600
Нафта	2,00	900	350	
	4,00	1000	400	
	8,00	1000	420	

Аналіз отриманих даних (табл. 4) дає підставу зробити наступні висновки: найбільш повно мастильну здатність БПР характеризує міцність мастильної плівки; в умовах високої контактної напруги більш ефективними добавками виявляються суміші жирів рослинного і тваринного походження з додаванням ПАР [4].

Враховуючи інтенсивне порушення цілісності та значну кавернозність стовбура свердловини, в процесі кріплення виникає завдання забезпечення максимально можливого заповнення кільцевого простору тампонажним матеріалом, який формував би якісний ізоляційний екран. Основний резерв покращення фізико-механічних властивостей цементного каменю, з одночасним підвищенням корозійної стійкості, криється у зменшенні міжзернової і капілярної пористості та поглибленні процесів гідратації, що може бути досягнуто зменшенням розмірів часток контактуючих матеріалів до мінімально можливих. Причому для такого випадку константа швидкості реакції контактування зростає обернено пропорційно квадрату радіусу часток. Також стає очевидно помітним ефект механічної активації,

пов'язаний зі зміною енергетичного стану поверхні часток та певною мірою з деформацією кристалічної структури поверхневого шару при підведенні механічної енергії.

Надійність кріплення свердловин, насамперед, залежить від відповідності тампонажних систем умовам застосування. Аналіз тампонажних систем, які нині застосовуються, показує, що вони за своїми властивостями не завжди відповідають гірничо-геологічним умовам: у більшості випадків їх не обробляють додатково для створення седиментаційно-стабільних систем, зниження водовіддачі, покращення реологічних властивостей, зниження проникності каменю, та не ставлять додаткових вимог до фізико-механічних і теплофізичних властивостей. Проте застосування седиментаційно-стійких тампонажних систем є необхідною передумовою для якісного цементування похило-скерованих та горизонтальних свердловин.

В'яжучі цементи все ще залишаються базовим матеріалом, який застосовують у практиці кріплення свердловин. У структурі використовуваних тампонажних матеріалів левову частку займають знов-таки типові цементи ПЦТ II-50, ПЦТ I-100, ПЦТ III-Пол 5-100, ШПЦС-120 та ОШЦ-120, і лише порівняно малу частину становлять модифіковані композиційні суміші [21].

З урахуванням зазначеного встановлено наступні вимоги до тампонажних систем для цементування свердловин. Тампонажний розчин і цементний камінь на його основі повинен відзначатися: високою стабільністю (нульове водовідділення та регламентована водовіддача) суспензії та достатньою корозійною стійкістю каменю до агресивних середовищ; необхідними фізико-механічними властивостями цементного каменю (обмежений період структуроутворення, інтенсивний набір ранньої міцності, мінімальна проникність), що є основою формування якісного ізоляційного кільця; мінімальним тепловиділенням під час гідратації та низькою теплопровідністю цементного каменю. У свою чергу буферна рідина повинна відзначатися структурно-реологічними параметрами, здатними до ефективного розділення циркулюючих технологічних рідин, покращеними відмивальними властивостями та зручністю у застосуванні.

Композиційні цементи тужавіють повільніше, особливо в початкові терміни, а в подальшому вони набирають високу міцність. У пластових умовах міцність каменю з композиційного цементу з часом зростає та значно перевищує міцність цементного каменю на основі вихідного портландцементу при випробуваннях на згин і на стиск. При гідратації композиційного цементу спостерігається менше тепловиділення. Цементний камінь на основі композиційних цементів характеризується високою тріщиностійкістю. Окрім цього, композиційні цементы характеризуються низькою проникністю та підвищеною корозійною стійкістю [14].

Типовий компонентний склад пропонованого композиційного тампонажного матеріалу КРТМ-ПВ (корозійностійкий розширний тампонажний матеріал з пониженою водовіддачею) для цементування свердловин в умовах впливу сольової агресії включає суміш ТС-100 в кількості 79,2 м.ч., шамотного пилу – 19,8 м.ч., армуючої домішки – 0,04 м.ч., МСН – 1 м.ч., стабілізатор Walocell – 0,15 м.ч., пластифікатор полікарбоксилатного типу – 0,2 м.ч. та піногасник DELFOAM – 0,2 м.ч.

Типова рецептура СБС (стабілізована буферна суміш) включає золу винесення теплоелектростанцій 65 м.ч., армуючу домішку 0,1 м.ч., піногасник DELFOAM 0,15 м.ч., полімерний реагент на основі метилгідроксиетилцелюлози Walocell 0,2 м.ч., кварцовий пісок 35 м.ч.

Для базових тампонажних матеріалів, а також КРТМ-ПВ проведено дослідження кінетики міцнісних характеристик цементного каменю у середовищах пластової води, хлористого та сірчано-кислого магнію, та оцінено коефіцієнт корозійної стійкості (рис. 1).

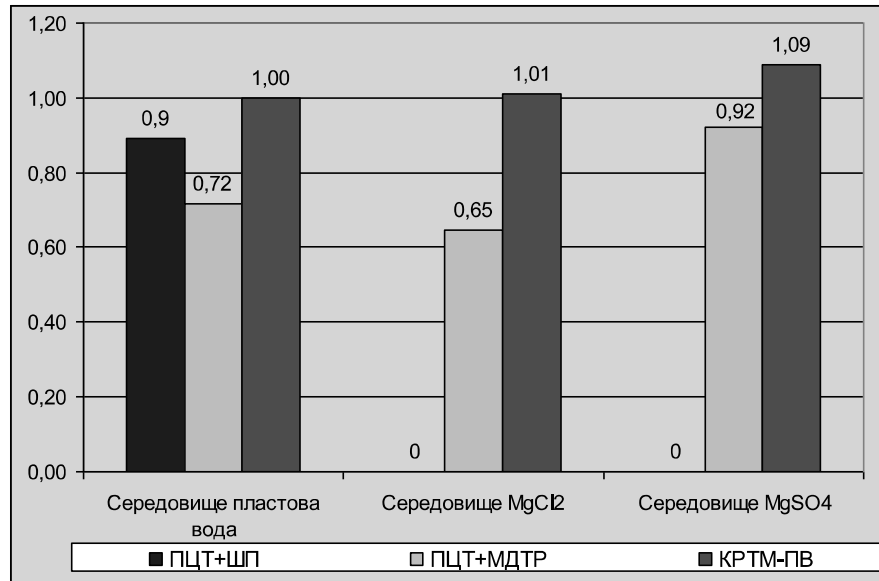


Рис. 1. Коефіцієнт корозійної стійкості тампонажних матеріалів

Дослідні дані рис. 1 дозволяють говорити про те, що для КРТМ-ПВ коефіцієнт корозійної стійкості K_c знаходиться в межах 1,0 - 1,09. У середовищі пластової води коефіцієнт корозійної стійкості для КРТМ-ПВ на 11 % вищий за відомий аналог ПЦТ I-100 + ШП та на 38,8 % переважає ПЦТ I-100 + МДТР. В умовах хлористого магнію та сірчаноокислого магнію КРТМ-ПВ переважає ПЦТ I-100 + МДТР на 55,4 % та 18,5 % відповідно. Для зрізів цементного каменю на основі ПЦТ I-100 + ШП у середовищі хлористого магнію та сірчаноокислого магнію характерне руйнування.

Дослідження фазового складу продуктів гідратації КРТМ-ПВ, що знаходився в агресивному сульфатно-магнієвому середовищі, свідчать, що для зразків характерна наявність основних гідратних фаз, затверділих в умовах високих температур і тисків, тампонажних композицій, зокрема високоосновних гідросилікатів Ca, гідрогеленіту, гідроалюмінату кальцію і гідроксиду кальцію. Продуктів корозії цементного каменю в даному складі лабораторно не виявлено.

Дані рентгенофазових досліджень добре корелюють з електронно-мікроскопічними дослідженнями зразків КРТМ-ПВ. Підвищені температура і тиск твердіння створюють передумови для формування просторової об'ємної структури цементного каменю зі значною кількістю гідратних утворень.

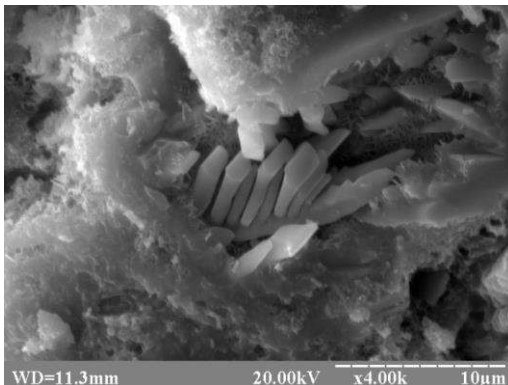


Рис. 2. Мікроструктура каменю КРТМ-ПВ у прісній воді

Аналіз мікроструктури досліджуваного зразка свідчить про інтенсивний перебіг процесів гідратації цементної композиції. В основній масі мікроструктура представлена великою кількістю гідратних утворень, причому деякі кристали вже добре оформлені, інші мають вигляд дрібних голчастих або лускоподібних кристалів. На цих кристалах формуються інші, що сприяє ступінчатому росту деяких шарів гідратних утворень.

На мікрофотографіях досліджуваного зразка (рис. 2) спостерігають велику кількість щільно упакованих гексагональних пластин, які можуть бути віднесені до портландиту. Щільна структура каменю досліджуваного складу забезпечується ростом і

стабільним існуванням гідросилікатів кальцію і гексагональних АFm-фаз та гідроксиду кальцію, що колюматують мікропори, сприяючи зміцненню штучного конгломерату.

Структура досліджуваного зразка КРТМ-ПВ у середовищі сірчаноокислого магнею досить щільна, покрита полідисперсними кристалогідратами у виді голчастих або пластинчастих кристалів. В деяких місцях на фоні великої кількості пластинчастих кристалів Са(ОН)₂ та АFm-фаз спостерігають незначні скупчення Mg(ОН)₂.

Таким чином, враховуючи результати дослідження тампонажних матеріалів, найбільш адаптованим для кріплення ускладнених хомогенних відкладів можна вважати КРТМ-ПВ.

Розроблені тампонажні системи КРТМ-ПВ та СБС успішно пройшли лабораторні тестування та дослідно-промислові випробування. Застосування КРТМ-ПВ та СБС проводиться із використанням стандартних технічних засобів і не потребує додаткового обладнання та корегування традиційної технології цементування свердловин [22].

Висновки

1. Проведений аналіз теоретичних і експериментальних досліджень поведінки гірських порід у середовищі БПР дає підставу вважати, що важливим аспектом науково-практичних пошуків є вивчення ролі дисперсних систем на водній основі як учасників свердловинних процесів, що у багатьох випадках контролюють міцність навколостовбурного масиву і термін служби породоруйнівного інструменту; тут особливий інтерес представляють існуючі гіпотетичні пояснення і моделі впливу робочих середовищ на водній основі на процес руйнування вибою свердловини.

2. Відповідними методичними підходами запропоновано стійкість стінок свердловини розглядати в двох механо-хімічних аспектах: механічна стійкість, яка залежить від зусиль і тисків, що діють на стінки стовбура, і здатність порід чинити опір цим навантаженням; хімічна взаємодія БПР з гірськими породами, які складають стінки свердловини.

3. Встановлено, що на мастильну здатність промивальних рідин не чинять істотного впливу технологічні фактори: вона в більшій мірі залежить від типу мастильної добавки та її компонентного і речовинного вмісту.

4. Показано шляхи підвищення надійності кріплення свердловин за наявності хомогенних відкладів, що може бути досягнуто за рахунок розроблення сучасних композиційних тампонажних систем, модифікованих поліфункціональними добавками, та удосконалення технології їх промислового застосування.

5. Досліджено особливості структуроутворення композиційних тампонажних систем, модифікованих сучасними поліфункціональними добавками, в умовах їх застосування.

6. Подальші експериментально-теоретичні дослідження властивостей запропонованих БПР і тампонажних матеріалів повинні продовжуватися у напрямках створення алгоритмів пошуку ефективних систем їх застосування відповідно до гірничо-геологічних і техніко-технологічних особливостей спорудження конкретної свердловини.

А.О. Іхнатов¹, Ye.M. Stavychnyi²

¹*National technical university «Dnipro Polytechnic», Ukraine*

²*PJSC «Ukrnafta»*

SOME ISSUES OF FLUSHING TECHNOLOGIES AND WELL CASING IN DIFFICULT CONDITIONS

The study of well construction features in difficult conditions, in particular, the processes of flushing and cementing, was carried out using modern methods of analytical analysis and experimental studies using mathematical and physical modeling methods, modeling techniques and processing research results in the SolidWorks, STATGRAPHICS, MATHCAD environment, control and measuring instruments and related materials.

Laboratory methods of control were used to study the technological characteristics of drilling fluids using special devices of the laboratory for monitoring the characteristics of cleaning agents, which are the working method for determining the characteristics of a hydraulic well washing program.

The designing of composite cementing material and stabilized buffer mixture was carried out using the method of orthogonal central-compositional planning, which makes it possible to reduce the number of experiments, streamline the search for optimal conditions, and obtain a mathematical model of the object of study.

The main directions for improving technological methods for the cycle of washing and cementing wells in complex geological and lithological conditions are outlined. As a priority direction for the development of well construction technology, methods for determining the formulations of high-quality flushing fluids, plugging systems, as well as designing a perfect technology for their application were chosen. The necessity of establishing the physical essence of the phenomena occurring during the implementation of well cleaning and casing technologies is substantiated, which in turn will allow to determine the most rational parameters of well construction processes, that is, maximum productivity at minimum cost. A composite expanding cement mixture and a stabilized buffer mixture have been developed and studied, and using the method of orthogonal central compositional planning, the optimal amount of modifying additives in the composition of these systems has been determined.

The obtained results of laboratory and analytical studies, as well as the generalization of industrial and bench data, are basic for designing the operating parameters of the process of flushing and plugging the casing string with guaranteed high technical and economic indicators. Data on the study of the features of well circulation processes and interaction with the wellbore of plugging systems are the initial ones for substantiating the design and technological parameters of the technical support of the well construction cycle.

Key words: *sedimentary deposits, cavern, cement slurry, fastening, drilling conditions, water loss, cement stone, surfactant, hydration processes, well.*

Література

1. Войтенко В., Вітрик В. Технологія і техніка буріння. – Київ: Центр Європи, 2012. – 708 с.
2. Pavlychenko A.V., Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Ratov, B.T., Zakenov, S.T. Problematics of the issues concerning development of energy-saving and environmentally efficient technologies of well construction // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1049. 012031.
3. Vaddadi N. Introduction to oil well drilling. – Bathos (U Vee Infosystems), 2015. – 204 p.
4. Павличенко А.В., Коровяка Є.А., Ігнатов А.О., Давиденко О.М. Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин. – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 201 с.
5. Коровяка Є.А., Ігнатов А.О. Прогресивні технології спорудження свердловин. – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 166 с.
6. Hossain M.E., Islam M.R. Drilling engineering: problems and solutions. – Wiley – Scrivener Publishing, 2018. – 627 p.
7. Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Haddad J., Tershak B., Kaliuzhna T., Yavorska V. Experimental and theoretical studies on the operating parameters of hydromechanical drilling // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2022. – N 1, P. 20–27.
8. Ihnatov A., Koroviaka Ye., Rastsvietaiev V., Tokar L. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling / Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons (GHT 2020): materials of IV International Scientific and Technical Conference // E3S Web of Conferences. 2021. – Vol. 230. – P. 01016..
9. Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Pinka, J., Rastsvietaiev V., Dmytruk O. Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – Vol. 1. – P. 11 – 18.
10. Ігнатов А.О., Ставичний Є.М. Геологічні й техніко-технологічні особливості кріплення нафтогазових свердловин з урахуванням фізико-хімічного стану їх

- стовбурів // Інструментальне матеріалознавство. Зб. наук. пр. – Випуск 24 – К.: ІНМ ім. В.Н. Бакуля НАН України, 2021. – С. 87–102.
11. Ігнатів А.О., Ставичний Є.М. Лабораторні та промислові дослідження процесу цементування нафтогазових свердловин в умовах товщ осадових порід // Інструментальне матеріалознавство: Зб. наук. пр. – Випуск 23. – К.: ІНМ ім. В.Н. Бакуля НАН України, 2020. – С. 88–103.
 12. Павличенко А.В., Ігнатів А.О., Коров'яка Є.А., Барташевський С.Є., Коротка І.Ю., Мекшун М.Р. Основи організації системи гідравлічного очищення свердловин // Збірник наукових праць НГУ. – 2021. – Вип. 67. – С. 136–152.
 13. Коцкулич Я.С., Тищенко О.В. Закінчування свердловин. – Київ: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 366 с.
 14. Ставичний Є.М., Ігнатів А.О. Особливості кріплення стовбура свердловини у хомогенних відкладах // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент–техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Випуск 22. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2019. – С. 164–174.
 15. Curry G.L., Feldman R.M. Manufacturing systems. Modeling and analysis. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 338 p.
 16. Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation / Benyoucef L. (Eds.) // Springer Series in Advanced Manufacturing (SSAM). – Springer Cham, 2020. – 250 p.
 17. Ставичний Є.М., Магун М.Я., Зіньков Р.В. Досвід спорудження свердловин на Волошківській площі в умовах проявлення текучості калієво-магнієвих солей // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 4. – С. 34–36.
 18. Davidenko A. Ighnatov A. Basic results of researches of lining and plugging processes at wells construction // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – N 9. – P. 58–64.
 19. Гупало О.П., Тушницький О.П. Органічна хімія. – К.: Знання, 2010. – 431 с.
 20. Sharma K.K., Sharma L.K. A Textbook of Physical Chemistry, 6th Edition. Vikas Publishing House, 2016. – 863 p.
 21. Ставичний Є.М. Оптимізація складів тампонажних систем // Sworld. – 2015. – Т. 4, № 1. – С. 8–12.
 22. Azar J.J., Robello S.G. (2007). Drilling Engineering. – PennWell Corporation, 2007 – 486 p.
- Надійшла 5.09.22*

References

1. Voitenko, V., & Vitryk, V. (2012). *Tekhnolohiya i tekhnika burinnya [Technology and technique of drilling]*. Kyiv: Center of Europe [in Ukrainian].
2. Pavlychenko, A.V., Ighnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., et al/ (2022). Problematics of the issues concerning development of energy-saving and environmentally efficient technologies of well construction. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 1049*, 012031.
3. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos (U Vee Infosystems).
4. Pavlychenko, A.V., Koroviaka, Ye.A., Ighnatov, A.O. & Davydenko, A.N. (2021). *Hidrohazodynamichni protsesy pry sporudzhenni ta ekspluatatsii sverdlovyln: monograph [Hydro-gas-dynamic processes during the construction and operation of wells]*. – Dnipro: Dnipro University of Technology [in Ukrainian].
5. Koroviaka, Ye.A. & Ighnatov, A.O. (2020). *Prohresyvni tekhnolohii sporudzhennia sverdlovyln: monograph [Advanced well construction technologies]*. – Dnipro: Dnipro University of Technology [in Ukrainian].
6. Hossain, M.E., & Islam, M.R. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Wiley – Scrivener Publishing.

7. Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Haddad, J., et al. (2022). Experimental and theoretical studies on the operating parameters of hydromechanical drilling. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 20–27.
8. Ihnatov, A., Koroviaka, Ye., Rastsvietaiev, V., et al. (2021). Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. Proceedings from Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons'20: *IV International Scientific and Technical Conference (GHT 2020)* (vol. 230, p. 01016). E3S Web of Conferences.
9. Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Pinka, J., et al. (2021). Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 11–18.
10. Ihnatov, A.A., & Stavychnyi, Ye.M., (2021). Heolohichni y tekhniko-tekhnologichni osoblyvosti kriplennia naftohazovykh sverdlodyn z urakhuvanniam fizyko-khimichnoho stanu yikh stovburiv [Geological and technical-and-technological features of casing oil and gas wells, taking into account the physical and chemical state of their wellbore]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling materials science*, 24, 87–102 [in Ukrainian].
11. Ihnatov, A.O., & Stavychnyi, Ye.M. (2020). Laboratorni ta promyslovi doslidzhennia protsesu tsementuvannia naftohazovykh sverdlodyn 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 [in Ukrainian].
12. Pavlychenko, A., Ihnatov, A., Koroviaka, Ye., et al. (2021). Osnovy orhanizatsii systemy hidravlichnoho ochyshchennia sverdlodyn [Fundamentals of organizing a hydraulic well cleaning system]. *Collection of research papers of the NMU*, 4(67), 136–152 [in Ukrainian].
13. Kotskulych, Ya.S., & Tyshchenko, O.V. (2004). *Zakinchuvannia sverdlodyn [Well completion]*. – Kyiv: Interpres LTD [in Ukrainian].
14. Stavychnyi, Ye.M., & Ihnatov, A.A. (2019). Osoblyvosti kriplennia stovbura sverdlodynny u khemohennykh vidkladakh [Fastening features barrel of bore hole in chemogenic deposits]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobratyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 22, 164–174 [in Ukrainian].
15. Curry, G.L. & Feldman, R.M. (2011). *Manufacturing systems. Modeling and analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
16. Benyoucef, L. (Eds.). (2020). Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation. *Springer Series in Advanced Manufacturing*. Springer Cham.
17. Stavychnyi, Ye.M., Mahun, M.Ia., & Zinkov, R.V. (2008). Dosvid sporudzhennia sverdlodyn na Voloshkivskii ploshchi v umovakh proiavlennia tekuchosti kaliievo-mahniievykh solei [The experience of construction of wells in the Voloshkovskaya area in the conditions of manifestation of fluidity of potassium-magnesium salts]. *Naftova i hazova promyslovisht – Oil and gas industry*, 4, 34–36 [in Ukrainian].
18. Davidenko, A. Ighnatov, A. (2016). Basic results of researches of lining and plugging processes at wells construction. *Metallurgical and Mining Industry*, 9, 58–64.
19. Hupalo, O.P., & Tushnytskyi, O.P. (2010). *Orhanichna khimiia [Organic chemistry]*. – Kyiv: Znannia [in Ukrainian].
20. Sharma K.K., & Sharma L.K. (2016). *A Textbook of Physical Chemistry, 6th Edition*. Vikas Publishing House.
21. Stavychnyi, Ye.M. (2015) Optymizatsiia skladiv tamponazhnykh system [Optimization of compositions of the tamponing systems]. *Sworl, 1, 1, 4*, 8–12 [in Ukrainian].
22. Azar, J.J., & Robello, S.G. (2007). *Drilling Engineering*. PennWell Corporation.