

6. Davydenko, A.N., Ratov, B.T., Pashchenko, A.A. (2018). *Vliyanie gidrostaticheskogo davleniya na udarnoe abrazivno-mehaniicheskoe burenie skvazhin* [Influence of hydrostatical pressure on percussion abrasive mechanical well drilling]. – Almaty: Kaspiyskiy obschestvenniy universitet [in Russian].
7. Gatlin, C. (1960). *Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions*. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, N.J 71.
8. Boiko, V.S. (2004). *Rozrobka ta ekspluatatsiia naftovykh rodovyshch* [Development and exploitation of the oil fields]. – Kyiv: Real-Prynt [in Ukrainian].
9. Uvakov, A.B. (1969). *Sharostruynoe burenie* [Pellet impact drill]. – Moscow: Nedra [in Russian].
10. Ihnatov, A.O., & Viatkin, S.S. (2013). Patent of Ukraine 102708.

УДК 622.245.4

DOI: 10.33839/2708-731X-23-1-88-103

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

ЛАБОРАТОРНІ ТА ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЦЕМЕНТУВАННЯ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН В УМОВАХ ТОВЩ ОСАДОВИХ ПОРІД

Проведено аналітичні і промислово-лабораторні дослідження чинників підвищення надійності кріплення свердловин в умовах хемогенних відкладень на прикладі родовищ Дніпровсько-Донецької западини шляхом розробки сучасних стабілізованих буферних рідин і нових технічних рішень й технологій стосовно обробки застійних кавернозних зон свердловин.

Дослідження виконані із застосуванням, зокрема, методик моделювання і обробки результатів досліджень в середовищі SolidWorks, STATGRAPHICS, MATHCAD; методів математичного планування експерименту – ортогонального центрально-композиційного планування; фізичного моделювання свердловинних циркуляційних процесів на лабораторному стенді, обладнаному контрольно-вимірвальним блоком; методик лабораторних способів контролю (згідно ДСТУ Б В. 2.7 - 86 - 99), відповідно до яких вивчалися технологічні властивості цементних розчинів і каменю.

Вивчені обмежувальні вимоги, що пред'являються до процесу кріплення свердловин у складних гірничо-геологічних умовах хемогенних відкладень нафтогазових родовищ Дніпровсько-Донецької западини. Дослідженнями технологічних показників фазового складу тампонажних систем доведена наявність обумовленості результатів кріплення підготовчими заходами, що проводяться в стовбурі свердловини. Доведено, що якісне цементування свердловин може бути забезпечено тільки належним відокремленням технологічних рідин, повним витісненням бурової промивальної рідини з кільцевого простору, винесенням шламу із застійних зон, а також застереженням виникнення повторного шламонакопичення в раніше очищених кавернозних інтервалах; перерахованим багатofакторним умовам відповідають структуровані буферні рідини. З дотриманням вимог принципу "тандему технологій", а саме: забезпечення максимальної сумісності з типовими промивальними рідинами й тампонажними матеріалами, розроблена стабілізована структурована буферна суміш, найбільш повно адаптована до гірничо-геологічних і техніко-технологічних умов споруджування свердловин у хемогенних відкладеннях Дніпровсько-Донецької западини. Потребам забезпечення якісного цементування обсадної колони в умовах хемогенних відкладень сповна відповідають певні технологічні параметри буферних сумішей і гідродинамічно обгрунтовані заходи процесу підготовки стовбура свердловини до кріплення.

Отримані результати лабораторно-промислових і аналітичних досліджень є базовими для проектування режимних параметрів процесу цементування обсадної колони з гарантованим

забезпеченням високих техніко-економічних показників. Дані з вивчення процесу шламонакопичення хомогенних відкладень є вихідними положеннями для обґрунтування конструктивних і технологічних параметрів пристроїв для створення осьового руху промивальної рідини в кавернозних зонах свердловини.

Ключові слова: буферна суміш, хомогенні відклади, каверна, цементний камінь, кріплення свердловин, умови буріння.

Постановка проблеми

Забезпечення високих техніко-економічних показників на етапах споруджування й експлуатації свердловин можливе тільки при дотриманні всіх технологічних вимог і норм. Особливо відповідальні вимоги ставляться до заходів, пов'язаних з підготовкою свердловини до цементування, від досконалості проведення яких безпосередньо залежить якість та успішність її кріплення. В той же час успішне проведення вказаних операцій обтяжує ускладнений стан стінок стовбура свердловини, що виражається, передусім, в наявності кавернозних зон і фільтраційних глинистих кірок, виникнення яких обумовлене безліччю об'єктивних геологічних і суб'єктивних технологічних чинників [1]. До першої групи провідних передумов утворення ускладнених інтервалів стовбура свердловин відносяться геологічні особливості формування товщ пластів і властивості цементуючої речовини, а також природна тріщинуватість, пористість і закарстованість порід. Друга група об'єднує чинники, пов'язані з особливостями фізико-хімічних властивостей промивальних рідин та циркуляційних процесів у стовбурі свердловини, динамікою роботи і впливом бурильної колони й породоруйнівного інструменту на навколишні породи тощо. Особливо великого значення розглянуті умови набувають при споруджуванні свердловин на нафтогазоносні комплекси пермських відкладів, а також карбону та девону, які потребують надійного розмежування потужного масиву хомогенних порід, схильних до деформаційних процесів та інтенсивного каверноутворення [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наявні промислові дані свідчать про наступне: базова технологія цементування свердловин в умовах залягання нестійких хомогенних відкладів, зокрема схильних до деформацій, полягає у застосуванні мінералізованої води як буферної рідини, а тампонажним матеріалом служить ПЦТ І-100 з домішкою шамотного пилу чи МДТР (модифікуюча домішка тампонажного розчину) [2]. Підготовка самого ж стовбура свердловини до спуску обсадної колони складається з таких операцій: проробки стовбура, шаблонування, циклічні промивання та лише у виняткових випадках удаються до застосування спеціальних пристроїв для обробки ускладнених зон [3].

Хоча останніми роками і досягнуті успіхи у вдосконаленні технологічних процесів кріплення і тампонажних матеріалів, що забезпечують покращення якості цементування стінок свердловин, однак все це не привело до суттєвого підвищення техніко-економічних показників будівництва та експлуатації свердловин. В ході аналізу й узагальнення фактичних геологічних, геофізичних і техніко-технологічних даних на нафтових і газових родовищах України та ряду зарубіжних країн були виявлені основні причини неякісного цементування свердловин, серед яких однією з найважливіших слід вважати змішування цементного розчину з глинисто-шламовими відкладеннями, що знаходяться на стінках стовбура свердловини та в кавернах [4].

Саме тому, велика увага приділяється питанням підготовки стовбура свердловини до цементування. Напрацювання в даному напрямі пропонують включати комплекс робіт зі створення захисного шару в пристовбурній зоні методом віброобробки, дво- і трифазні пінні системи, вихрові потоки, струминну кольматацію стінок, механічне ущільнення фільтраційної кірки, технологію селективної ізоляції і т.д. Але найбільш ефективною технологією, за думкою багатьох дослідників, вважається видалення глинисто-шламових відкладень за допомогою спеціальних пристроїв у поєднанні із застосуванням буферних рідин нового покоління [5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Гостра необхідність запобігання дефектам кріплення, які зумовлені також деформаційними процесами та порушенням стійкості обсадних колон, у даному випадку, в хомогенних відкладах призвели до вироблення різноманітних, іноді абсолютно протилежних підходів до кріплення свердловини як інженерної споруди.

Необхідність кріплення, насамперед, хомогенних відкладів (обсадні колони в яких піддаються впливу руйнівних деформаційних зусиль, обумовлених відсутністю за ними надійного ізоляційного екрану), що передує розкриттю нижчерозташованих покладів вуглеводнів, залишається актуальною і потребує вирішення комплексу завдань для забезпечення якісного кріплення свердловини на весь період експлуатації. Аналіз промислових даних дозволяє стверджувати наступне: каверноутворення є одним з найпоширеніших видів порушень технологічного процесу при провідці свердловин, що має безпосередній вплив на успішність і якість її кріплення. Наявність в стовбурі свердловини місцевих розширень загрожуватиме виникненням аварійних ситуацій і істотно знижує техніко-економічні показники буріння, а також, в подальшому, в умовах залягання нестійких хомогенних відкладів, матиме вплив на експлуатацію свердловин. Одним із перспективних шляхів вирішення зазначеної проблеми в напрямі техніки й технології цементування є застосування високоефективних композиційних тампонажних систем у поєднанні з інноваційними рішеннями, які б у комплексі забезпечили надійне та довговічне кріплення свердловини.

Мета статті полягає у розгляді й обґрунтуванні умов забезпечення підвищення надійності кріплення свердловин за наявності хомогенних відкладів на прикладі родовищ Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) шляхом розроблення та впровадження сучасних техніко-технологічних рішень.

Обґрунтування вживання і опис вибраної автором методики

Дослідження особливостей споруджування свердловин на прикладі хомогенних відкладів ДДЗ, зокрема їх 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-вимірвальних приладів і матеріалів.

Оптимізацію складу стабілізованих буферних сумішей (СБС) виконано із застосуванням методів математичного планування експерименту (МПЕ), а саме 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 поділявся на чотири етапи: складання моделі, що планувалась; підготовка необхідних вихідних даних; розрахунок моделі; отримання результатів. Суть планування експериментів з використанням методу МПЕ полягала у встановленні математичної залежності між заданими властивостями і складом чи витратою матеріалів.

Протікання свердловинних циркуляційних процесів моделювали на спеціальному лабораторному стенді, обладнаному контрольно-вимірвальним блоком (витратомір, манометр, термоанемометр, координатник).

Лабораторними способами контролю вивчали терміни схоплювання і пластичну міцність тампонажних розчинів за допомогою приладу Віка, а також межу міцності кубиків цементного каменю при одновісному стискуванні на напівавтоматичному гідравлічному пресі серії KD, що є робочою методикою визначення показників процесу тампонування свердловин. Порядок проведення випробувань відповідав нормам ДСТУ Б В. 2.7 - 86 – 99.

Виклад основного матеріалу дослідження

Мінералізована пластова вода як буферна рідина має підвищений показник відмивальної здатності. Вплив репресії при цементуванні на швидкість фільтрації тампонажного розчину в пласт може бути значним у разі руйнування кірки бурового розчину з поверхні високопроникних горизонтів, що характерні для умов ДДЗ, під час кріплення хомогенних пермських відкладів і покрівлі московського ярусу верхнього карбону, що складена високопроникним пісковиком. Фільтраційна кірка порівняно із зоною кольматації пор твердою фазою характеризується більш низькою проникністю, що у більшості випадків визначає об'єм фільтрату тампонажного розчину, який проникає у пласт [6]. На основі вищесказаного, як приклад цементування свердловини 55-Ярошівська, можна зробити висновок, що буферна рідина – мінералізована вода – спричинила інтенсивне руйнування фільтраційної кірки, а тампонажний розчин із нерегламентованою водовіддачею забезпечив відфільтровування води замішування у високопроникний горизонт. Результати лабораторних досліджень підтвердили твердження, що причиною передчасного тужавлення тампонажного розчину стало відфільтрування води замішування, більше 20%, під час його контакту з високопроникним пісковиком, і час загуснення значно скоротився, тобто став таким, що не прокачується через 3,2 год від початку замішування.

Низьков'язкі буферні рідини не здатні забезпечити ефективного розмежування технологічних рідин, а також створити належних умов видалення глинистої кірки зі стінок свердловини. Внаслідок цього суттєво погіршуються фізико-механічні властивості цементного каменю (особливо за наявності каверн), що підтверджено результатами експериментальних досліджень впливу твердої фази бурової промивальної рідини (БПР) на властивості тампонажних розчинів та цементного каменю.

Необхідно відмітити, що глиниста фаза може потрапляти в тампонажний розчин як на основі глинопорошку, з якого приготвлена бурова промивальна рідина, так і внаслідок проникнення тонкодисперсних частинок та колоїдної складової розбурюваних гірських порід. Наявний вміст твердої фази спричинить погіршення якості цементного каменю. Слід також помітити, що і глинопорошки, які використовують для приготування БПР, можуть містити окрім монтморилоніту мінерали інших глин, а крім того, не виключається застосування в процесі приготування БПР глин нижчої якості. Тому приведені факти вимагають детального вивчення.

Одним із найважливіших показників, що характеризує кінетику зростання міцності

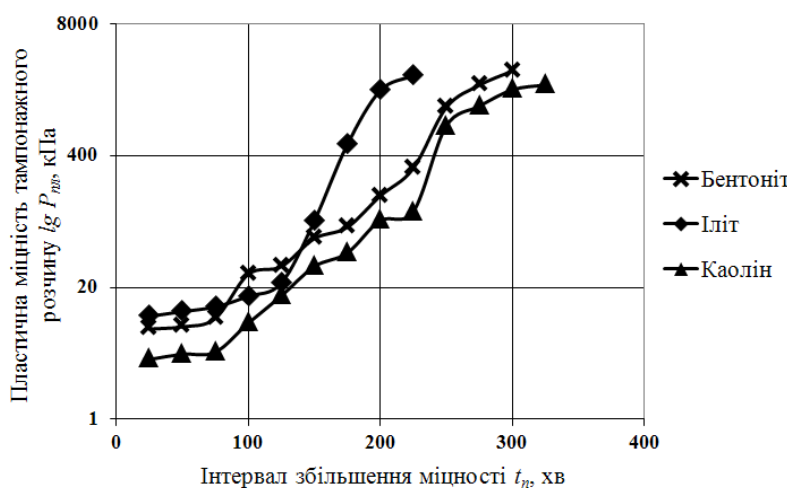


Рис. 1. Зміна пластичної міцності тампонажного розчину при введенні різних домішок

тампонажного розчину в часі, є пластична міцність – параметр, який дозволяє оцінювати не тільки рухливість розчину, а й дає змогу якісно прогнозувати можливість проникнення у розчин сторонніх домішок.

Графічні залежності (рис. 1) наростання пластичної міцності тампонажних розчинів при введенні в них глин різних мінералогічних груп (дрібнодисперсних фракцій, з розміром часток до $5 \cdot 10^{-4}$ м) із граничною концентрацією 10% мають досить різноманітний

характер. Звертає на себе увагу те, що хоча графіки і мають схожий вигляд, все ж зростання

пластичної міцності відбувається з інтенсивністю, яка змінюється в часі, і великою мірою нерівномірності. Іншими словами, для кожної з тампонажних сумішей тривалість існування періоду пластичної рухливості, яка дозволяє проникати в розчин продуктам руйнування і фільтраційній кірці, не видалених із стовбура свердловини, досить велика. Ці чинники також зумовлюють нерівномірність наростання міцності структури розчину в інтервалі каверни після порівняння з відповідними показниками в кільцевому просторі, що природно спричиняє виникнення локальних зон концентрації напруження на межах переходу.

Подальші стендові експериментальні дослідження [7] показали наявність тісного взаємозв'язку між міцністю цементного каменю і концентрацією в ньому сторонніх домішок. В результаті недостатньої міри видалення з каверн уламків зруйнованої породи на етапі продавлювання тампонажної суміші в затрубний простір відбувається активне взаємопроникнення. Як наслідок, в таких умовах неможливо забезпечити формування якісного ізоляційного екрану та надійне розмежування горизонтів.

Спостереження показали, що при потраплянні тампонажного розчину в зону каверни відбувається або зважування в ньому уламків зруйнованої гірської породи або фільтраційна течія тампонажної суспензії крізь шламові накопичення з БПР, про це свідчать фотографії, представлені на рис. 2.

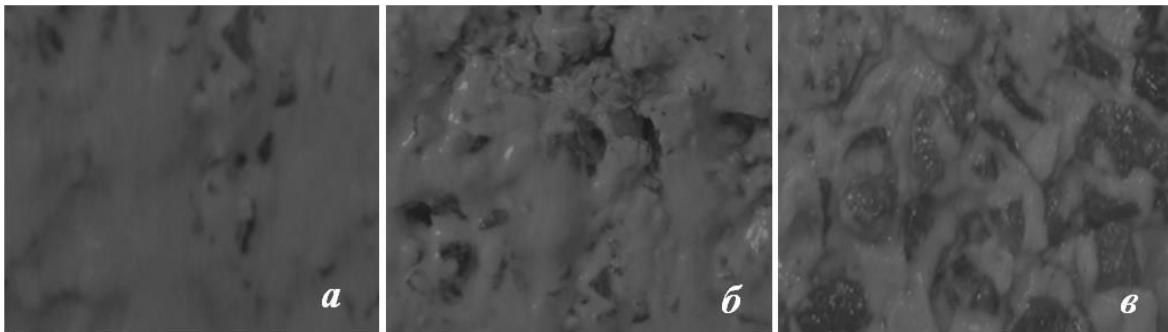


Рис. 2. Характер розподілу тампонажної суспензії з БПР та шламовим матеріалом в кавернозному інтервалі (збільшено $\times 2,5$)

Рис. 2 (а, б) показує, що розміщення тампонажної суміші в кавернозному інтервалі відбувалося з розмивом шламових відкладень та їх розподілом в об'ємі розчину, який тужавіє. Вивчення структури тампонажного каменю по висоті каверни показало його неоднорідність у зв'язку з наявністю в складі шламових включень, дрібні фракції яких виявляються переважно у верхніх ділянках (рис. 2, а), а великі – в нижніх (рис. 2, б). Потрібно помітити наступне: в зв'язку з різною густиною тампонажного розчину й щільністю мінерального скелету уламків зруйнованої породи (значно більшою) відбувається їх переміщення в полі дії сили тяжіння, що спричиняє вплив на формування структури тампонажної системи. Причому, інтенсивність вказаних процесів безпосередньо визначається водоцементним співвідношенням, вибір якого, в основному, здійснюється, виходячи з умов забезпечення можливості прокачування тампонажної суміші [1].

Розподіл тампонажного розчину в зоні каверн може відбуватися і без змішування, з проникненням потоку розчину у вигляді окремих струменів, що переміщуються в поровій структурі масиву шламових скупчень (рис. 2, в). Необхідно також підкреслити, що окрім позначених чинників, на спрямованість і характер процесу розподілу тампонажної суміші впливає швидкість її потрапляння, потужність кавернозного інтервалу, а, отже, і самих шламових скупчень та їх гранулометричний склад.

Відносно показників міцності взірців (рис. 3), можна сказати, що вони значно нижче теоретичних для цього тампонажного матеріалу (це стосується випадку розподілу уламків у

тампонажній суміші). При дослідженні взірців, сформованих в результаті струминного розподілу тампонажного розчину в об'ємі шламових скупчень, встановити якихось досить об'єктивних показників не вдалося в зв'язку з низькою мірою міцності взірців.

Дані рис. 3 свідчать також про дуже явний зв'язок між міцністю тампонажного каменю, водоцементним співвідношенням і гранулометричним складом включень. Із збільшенням розмірів (середні фракції і вище) і паралельним зростанням водоцементного співвідношення досить інтенсивно знижується міцність випробовуваних взірців на одновісне стискування. Причому, тріщиноутворення в цих умовах проявляється при вертикальному навантаженні, що становить близько 65 - 75% такого для взірців, виготовлених з тампонажної суміші без включень. Злам, як правило, відбувається по контактних поверхнях окремих шламових часток.

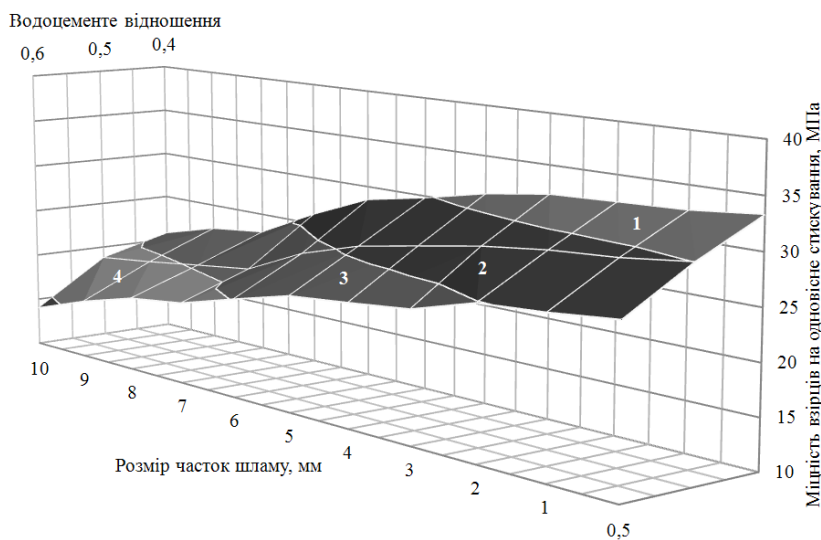


Рис. 3. Міцність взірців цементного каменю, що містять сторонні домішки різних фракційних груп при змінному водоцементному співвідношенні: 1 – (1-2) мм до 60%; 2 – (2-3) мм до 60%; 3 – (5-6) мм до 60%; 4 – (8-9) мм до 60%

Таким чином, при цементуванні свердловин у складних гірничо-геологічних умовах необхідно забезпечити: якісне розділення технологічних рідин, повне витіснення бурової промивальної рідини з кільцевого простору та винесення шламу із застійних зон при забезпеченні необхідного рівня відмивальних властивостей, створити передумови збереження цілісності стовбура свердловини й застереження виникнення повторного шламонакопичення в раніше очищених кавернозних інтервалах [8]. Вищезазначені умови можуть виконати структуровані буферні рідини [5].

На родовищах ДДЗ у якості буферних рідин здебільшого застосовують технічну воду, рідину замішування тампонажного розчину, водні розчини солей, водні розчини ПАР і водорозчинних полімерів, насамперед, ефірів целюлози. До основних недоліків даних буферних рідин необхідно віднести низьку густину рідин, відсутність можливості обважнення рідини, небезпеку випадання обважнювачів в осад при витісненні обважнених бурових промивальних рідин. Крім того, в результаті застосування таких буферних рідин зменшується гідростатичний тиск на нестійкі відклади та флюїдонасичені пласти. При цьому виникають додаткові ризики щодо порушення цілісності стінок свердловини та можливої міграції флюїдів. У відповідності до висунутих умов й обмежень та дотриманням вимог принципу «тандему технологій», а саме: забезпечення максимальної сумісності з типовими промивальними рідинами і тампонажними матеріалами, розроблено стабілізовану буферну суміш СБС [9], що якнайповніше адаптована до гірничо-геологічних і техніко-технологічних умов споруджування свердловин у хомогенних відкладах на родовищах ДДЗ.

СБС виготовлено на базі виробничих потужностей заводу сухих будівельних сумішей ТОВ «Геліос» (м. Львів) за рецептурою: зола винесення теплоелектростанцій 65 м.ч. (масова частка), армуюча домішка 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. Суттєвою перевагою застосування СБС є технологічна зручність у приготуванні рідини в умовах свердловини. Для цього необхідну кількість СБС завантажують у цементно-змішувальну машину і транспортують до свердловини. З допомогою насоса цементувального агрегату подають воду у кількості, необхідній для досягнення потрібної густини буферної рідини, і гомогенізують в осереднюючій ємкості. Приготовану буферну рідину нагнітають у свердловину і проводять цементування за загальноприйнятою технологією.

Оптимізацію складу СБС виконано із застосуванням МПЕ [10]. Характеристику планування експерименту, матрицю планування і результати повного двофакторного експерименту наведено в табл. 1 та 2 відповідно.

Таблиця 1. Планування експерименту оптимізації складу СБС

Характеристика	Параметри планування	
	стабілізатор, м.ч. (x_1)	кремнезем, м.ч. (x_2)
Головний рівень "0"	0,20	35
Нижній рівень "-1"	0,15	30
Верхній рівень "+1"	0,25	40
Інтервал варіації	0,05	5

При плануванні експерименту вибрано наступні параметри:

Y_1 – розтічність буферної суспензії, мм;

Y_2 – водовідділення, мл;

Y_3 – водовіддача буферної суспензії, см³ за 30 хв;

Y_4 – відмивальна здатність, %.

Таблиця 2. Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

Система дослідів	Номер дослідів	x_1	x_2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
Повний факторний експеримент	1	+1	+1	190	0	8	47
	2	+1	-1	200	0	10,5	40
	3	-1	+1	230	1,5	11	49
	4	-1	-1	240	2	16	44
Досліди в зіркових точках	5	+1	0	200	0	8,5	44
	6	-1	0	235	0,5	13	46
	7	0	+1	210	0	9	48
	8	0	-1	210	0,5	11	43
Центр плану	9	0	0	210	0	9,5	46

Отримані результати розрахунку коефіцієнтів регресії подано в табл. 3. На основі зазначених коефіцієнтів отримано рівняння регресії досліджуваних функцій властивостей буферної системи (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4).

Таблиця 3. Коефіцієнти рівнянь регресії

Функції відгуку	Коефіцієнт регресії					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Y_1	212,037	-19,167	-3,333	5,278	-2,222	0,0
Y_2	-0,074	-0,667	-0,167	0,444	0,444	0,125
Y_3	9,537	-2,167	-1,583	1,278	0,528	0,625
Y_4	45,59	-1,333	2,833	-0,556	-0,556	0,5

Таблиця 4. Порівняльні властивості буферних сумішей

Показники	Тип сумішей		
	СБС	БС НВП «Спецматеріали»	<i>MUDPUSH II</i> «Schlumberger»
Густина, кг/м ³	1640	1710	1640
Розтічність, мм	200	210	195
Водовідділення, мл	0	0	0
Показник фільтрації, см ³ за 30 хв	8	9	8
Пластична в'язкість, мПа·с	65	48	28
Динамічне напруження зсуву, дПа	288	211,2	259,2
Відмивальна здатність, %	49	43	15
Відносна вартість за 1 м ³	1	1,6	3,8

Встановлено, що ряд відомих буферних сумішей *MUDPUSH II* фірми «Schlumberger» та буферна суміш БС НВП «Спецматеріали» (табл. 4.) в процесі замішування потребує додаткових обробок хімреагентами, що спричиняє додаткові затрати часу і коштів на їх приготування. Також встановлено, що серед недоліків останніх – висока вартість та складність і тривалість приготування у польових умовах, особливо при температурах нижче 0°C.

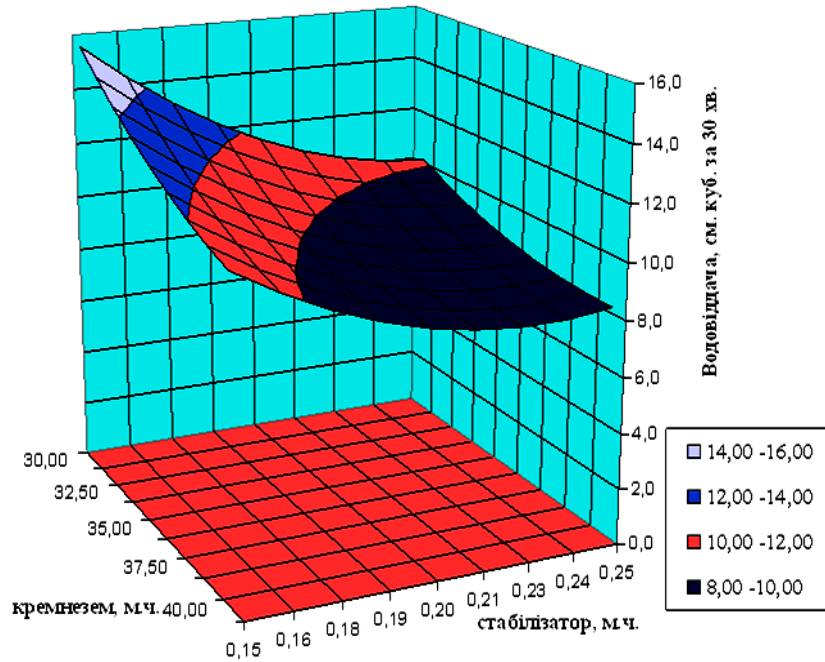
За результатами експериментальних досліджень в окресленому інтервалі зміни кількісного співвідношення кремнезему та стабілізатора отримано рівняння регресій для розтічності, водовідділення, водовіддачі та відмивальної здатності спроектованої буферної системи. Як приклад, на рис. 4, *a* і *б* наведено ізопараметричні поверхні та діаграми зміни водовіддачі буферної системи.

Базова буферна рідина на основі СБС при нульовому водовідділенні і добрій прокачуваності (розтічність не менше 200 мм) має необхідні структурно-реологічні властивості (пластична в'язкість до 65 мПа·с, динамічне напруження зсуву 288 дПа) та відмивальну здатність (для нескранованої фільтраційної кірки до 49 %). Базова СБС перевершує відомі в Україні аналоги.

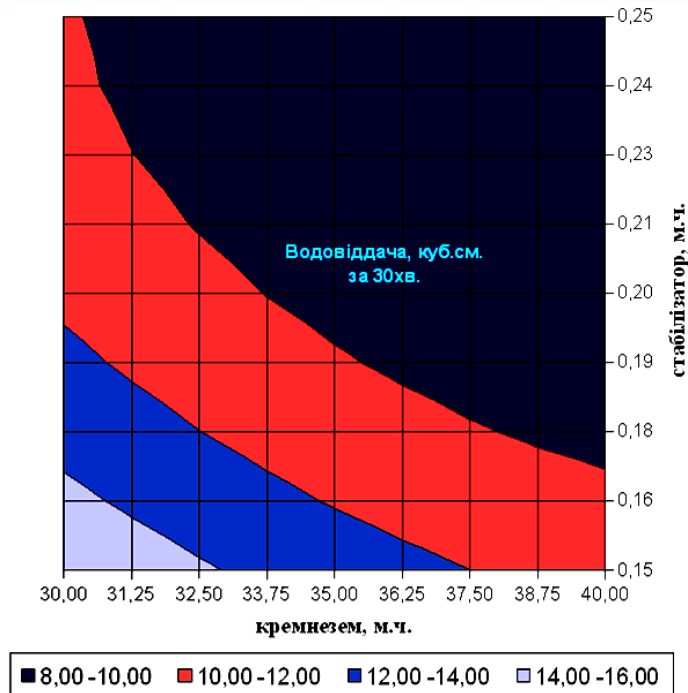
Буферна суміш СБС здатна забезпечити:

- надійне розділення промивальної рідини і тампонажного розчину для запобігання їх змішуванню в трубах і кільцевому просторі;
- ефективне вимивання промивальної рідини з кільцевого простору свердловини і витіснення її з каверн і розширених ділянок;

- руйнування фільтраційної кірки і винесення її на поверхню;
- створення умов для надійного контакту тампонажного каменю зі стінками свердловини та обсадними трубами;
- запобігти змішуванню технологічних рідин а, відповідно, і зменшенню витрат тампонажного розчину.



а



б

Рис. 4. Ізопараметричні поверхні (а) та діаграми (б) зміни водовіддачі буферної системи

Ефект від використання розробленої буферної суміші СБС досягнуто за рахунок високого ступеня: виносної та утримуючої здатності (видалення та винесення шламу із застійних зон каверн та запобігання їхній седиментації), що у поєднанні із застосуванням пристроїв поінтервального очищення, які використовують енергію активних струменів, формованих за допомогою реалізації тих або інших гідродинамічних явищ в рідині, дозволяє досягати високого ступеню очищення кавернозних інтервалів свердловини [11]; відмивальної здатності (очищення стінок свердловини від нещільної, рихлої частини глинистої кірки, що забезпечує підвищення щільності контактного зчеплення цементного каменю з обсадною колоною і стінками свердловини); розділяючої здатності (попередження утворення непрокачуваних сумішей на контакті технологічних рідин та їхнє ефективне розмежування).

Необхідність пред'явлення підвищених вимог до процесу очищення каверн підтверджується наступними промислово-лабораторними даними. Реально контрольованим параметром стану стовбура свердловини є безрозмірний коефіцієнт кавернозності K , що

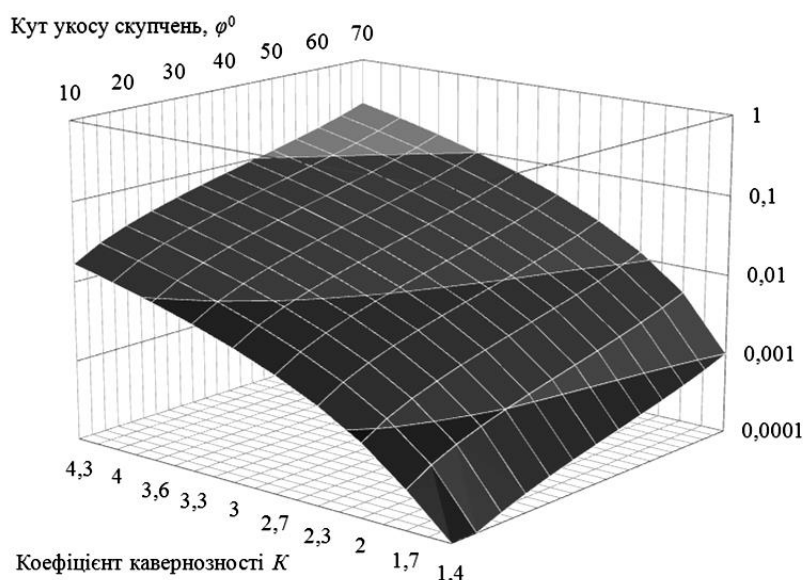


Рис. 5. Об'єм шламових скупчень в кавернозному інтервалі свердловини

виражає збільшення діаметру стовбура свердловини в порівнянні з номінальним діаметром породоруйнівного інструменту. Провідною характеристикою, що визначає процес шламонакопичення в кавернозній зоні свердловини, є також і кут їх укосу φ . При цьому дослідження показують практично рівномірне збільшення потужності глинисто-шламових скупчень в напрямі від осі свердловини до стінки каверни. Максимальних значень кут укосу

накопичень досягає при коефіцієнті кавернозності, що дорівнює 2.

Рис. 5 ілюструє залежність прогнозованого об'єму шламових скупчень від K і φ .

Стає очевидною істотність впливу вказаних чинників на результати акумуляції продуктів руйнування в кавернах, вираженої в об'ємі глинисто-шламових паст, розмірність якого на графіці, для зручності аналізу даних, показана в логарифмічному масштабі. З рис. 5 чітко впливає безпосередня залежність інтенсивності шламонакопичення від коефіцієнту кавернозності при його значенні 3 і більше.

В результаті недосконалості підготовчих операцій відбувається активне взаємопроникнення глинисто-шламових паст і тампонажного розчину, що веде до зниження показників технологічних властивостей цементного каменю. Міра впливу на властивості тампонажного розчину і каменю сторонніх домішок визначається їх концентрацією.

На рис. 6 наведено залежність об'єму глинисто-шламових паст, а отже і їх концентрації, від показників стану стовбура свердловини і кавернозних скупчень.

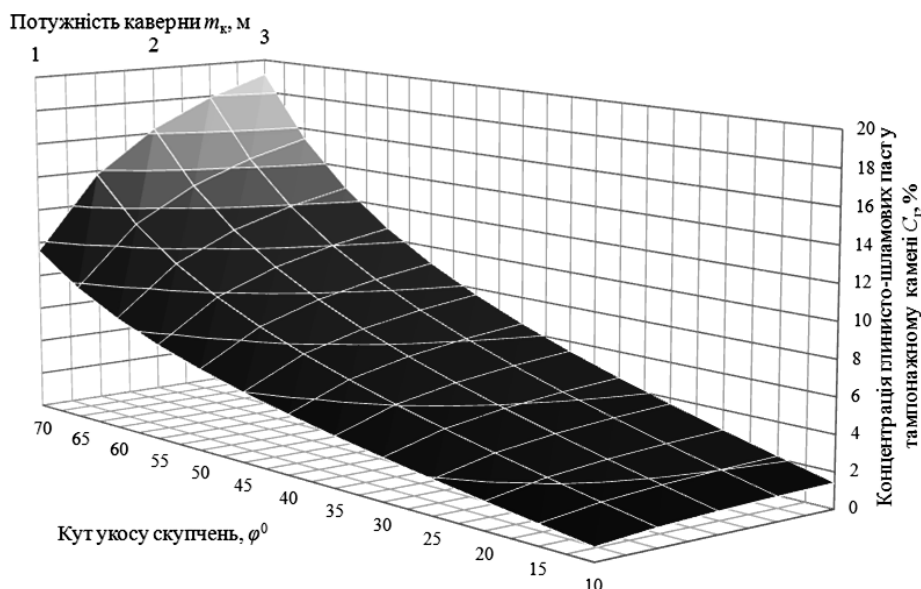


Рис. 6. Вміст глинисто-шламових паст у тампонажному камені

Представлені дані свідчать, що у міру наростання кута укосу кавернозних скупчень, що є похідною як коефіцієнта кавернозності, так і потужності каверни m_k , відбувається інтенсивне підвищення концентрації глинисто-шламових паст у тампонажному розчині, а в наслідок і камені. Приведені відомості характеризують дані явища тільки в невеликому діапазоні потужностей каверн від 1 до 3 м, але у міру її збільшення концентрація продовжує стрімко рости.

Таким чином, за наявності в геологічному розрізі свердловини зон глинистих фацій, хомогенних відкладень, слабозцементованих порід, тектонічних порушень, карстових порожнеч, які є потужним чинником виникнення каверн значних розмірів, необхідно передбачати обмеження і певні профілактичні заходи в технології буріння, а також особливо ретельно підходити до питань підготовки стовбура свердловини до кріплення.

Залежності основних технологічних властивостей розробленої буферної системи від компонентного складу показано в табл. 5.

Таблиця 5. Властивості буферної суміші СБС

Номер досліді	Вміст компонентів, м.ч.			Розтічність буферної суспензії, мм	Водовідділення, мл	Водовіддача, см ³ за 30 хв	Відмивальна здатність, %
	базова суміш	кремнезем	стабілізатор				
1	60	40	0,25	190	0	8	47
2	70	30	0,25	200	0	10,5	40
3	60	40	0,15	230	1,5	11	49
4	70	30	0,15	240	2	16	44
5	65	35	0,25	200	0	8,5	44
6	65	35	0,15	235	0,5	13	46
7	60	40	0,20	210	0	9	48
8	70	30	0,20	210	0,5	11	43
9	65	35	0,20	210	0	10	46

Отже, зростання кількості домішки кремнезему у складі суміші призводить до зменшення розтічності, що ускладнюватиме її приготування під час цементування свердловини. У свою чергу, зменшення цієї добавки призведе до зниження відмивальної здатності суспензії. Таким чином, експериментально встановлено оптимальну кількість кремнезему – 35 м.ч. Оптимальний вміст стабілізатора складає 0,2 м.ч. Концентрація стабілізатора нижча, ніж 0,15 м.ч., не забезпечує технологічно необхідну стабільність та може призвести до осідання дисперсійної фази у суспензії і зростання водовіддачі. Натомість вміст більше 0,25 м.ч. призведе до суттєвого зниження розтічності буферної системи, що ускладнюватиме процес її приготування в умовах свердловини. Як базову суміш застосовано композицію, що включає золу (65 м.ч.), армуючу домішку (0,1 м.ч.) та піногасник у кількості 0,15 м.ч.

Розроблена буферна система забезпечує можливість ефективного регулювання структуро-реологічних та технологічних параметрів (табл. 6).

Таблиця 6. Параметри буферної системи СБС

Показники	СБС		
	В/С – 0,47	В/С – 0,45	В/С – 0,43
Густина, кг/м ³	1600	1650	1700
Розтічність, мм	230	220	210
Водовідділення, мл	1,0	0	0
Показник фільтрації, см ³ за 30 хв	10	9	8
Пластична в'язкість, мПа·с	55	65	48
Динамічне напруження зсуву, дПа	288	288	360
Відмивальна здатність, %	47	49	46

Отже, розроблена система на основі СБС характеризується підвищеною стабільністю при нульовому водовідділенні та обмеженій водовіддачі, а також необхідними технологічними властивостями, зокрема розтічністю, відмивальною здатністю та структурно-реологічними властивостями.

Висновки

1. За результатами досліджень, комплексного аналізу та тестування вихідних матеріалів й технологічних характеристик визначено основні напрямки створення композиційного складу буферних рідин для здійснення гідравлічної програми цементування свердловин у складних гірничо-геологічних умовах.

2. Показана пряма залежність ефективності бурових робіт від якості проведення операцій по кріпленню свердловин. Вивчений вплив кута укусу скупчень і коефіцієнта кавернозності на об'єм шламових паст в ускладнених інтервалах. Розглянута дія глинистої фази на показники міцності тампонажного каменю.

3. З урахуванням вимог інноваційного принципу «тандему технологій» розроблено композиційну стабілізовану буферну суміш СБС для умов цементування хомогенних відкладів у свердловинах родовищ ДДЗ.

4. Експериментально-теоретичні дослідження властивостей стабілізованих буферних сумішей та гідродинамічних характеристик циркуляційних процесів при роботі пристрою підготовки стовбура свердловини до цементування повинні продовжуватися у напрямках створення алгоритмів пошуку ефективних композицій матеріалів та підготовчих заходів

кріплення відповідно до гірничо-геологічних і техніко-технологічних особливостей споруджування конкретної свердловини.

А.О. Ігнатів¹, Ye.M. Stavychnyi²

¹*National Technical University «Dnipro Polytechnic»*

²*Public Joint Stock Company «Ukrnafta»*

LABORATORY AND INDUSTRIAL RESEARCH OF CEMENTATION PROCESS OF OIL-AND-GAS BORE HOLES IN THE CONDITIONS OF SEDIMENTARY ROCK BEDS

Analytical and industrial laboratory research of factors of increase in reliability of fastening bore holes in the conditions of chemogenic sedimentations using the example of the Dnepr-Donetsk cavity deposits by developing modern steady-state mud spacers and new technical decisions and technologies of treatment of bore holes stagnant cavernous zones was carried out.

The research was done using methods of modeling and processing of research results in the SolidWorks, STATGRAPHICS, MATHCAD environments, as well as methods of the mathematical experiment planning – orthogonal central composition planning; physical modeling of well circulation processes on a laboratory stand, equipped by a control and measuring block; laboratory control methods (according to DSTU B V 2.7-86-99), which technological properties of cement solutions and stone were studied in accordance with.

Restrictive requirements, applied to the process of fastening bore holes in the difficult mining and geological conditions of chemogenic sedimentations of Dnepr-Donetsk cavity oil-and-gas deposits, are studied. Research of technological indexes of the cement systems phase composition proves that the results of fastening depend on preparatory measures, conducted in the barrel of bore hole. It is well-proven that the high-quality cementation of bore holes can be provided only with the proper division of technological liquids, complete expulsing of boring washing liquid from circular space, the bearing-out of mud from stagnant areas, as well as preventing the repeated sludge accumulation in the cavernous intervals which were cleared before; the structured buffer liquids meet all of these requirements. Following the requirements of "technologies tandem" principle, namely providing the maximal compatibility with typical bore liquids and cement materials, the stabilized structured mud spacer, most fully adapted to the mining, geological, technical and technological conditions of bore holes building in the chemogenic sedimentations of the Dnepr-Donetsk cavity, was designed.

The requirements to provide the high-quality cementation of column in the conditions of chemogenic sedimentations are fully met by the specific technological parameters of mud spacers and hydrodynamically justified measures of barrel bore hole fastening preparation.

The results of industrial laboratory and analytical research are basic for planning regime parameters of column cementation process with the guaranteed high technical and economic indexes. Data on the study of sludge accumulation process within chemogenic sedimentations can be basis for justification of structural and technological parameters of devices for creating the axial motion of washing liquid in the bore hole cavernous zones.

Key words: *mud spacer, chemogenic sedimentations, cavernous, cement stone, bore holes fastening, boring drilling conditions.*

А.А. Игнатов¹, Е. М. Ставичный²

¹*Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»*

²*Публичное акционерное общество «Укрнефть»*

ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ТОЛЩИН ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Проведены аналитические и промышленно-лабораторные исследования факторов повышения надежности крепления скважин в условиях хемогенных отложений на примере месторождений Днепро́вско-Донецкой впадины путем разработки современных стабилизированных буферных

жидкостей и новых технических решений и технологий применительно к обработке застойных кавернозных зон скважин.

Исследования выполнены с применением, в частности, методик моделирования и обработки результатов исследований в среде SolidWorks, STATGRAPHICS, MATHCAD; методов математического планирования эксперимента - ортогонального центрально-композиционного планирования; физического моделирования скважинных циркуляционных процессов на лабораторном стенде, оборудованном контрольно-измерительным блоком; методик лабораторных способов контроля (согласно ДСТУ Б В. 2.7 - 86 – 99), в соответствии с которыми изучались технологические свойства цементных растворов и камня.

Изучены ограничительные требования, предъявляемые к процессу крепления скважин в сложных горно-геологических условиях хемогенных отложений нефтегазовых месторождений Днепровско-Донецкой впадины. Исследованиями технологических показателей фазового состава тампонажных систем доказано наличие обусловленности результатов крепления подготовительными мероприятиями, проводимыми в стволе скважины. Доказано, что качественное цементирование скважин может быть обеспечено только надлежащим разделением технологических жидкостей, полным вытеснением буровой промывочной жидкости из кольцевого пространства, выносом шлама из застойных зон, а также предостережением повторного шламонакопления в ранее очищенных кавернозных интервалах; перечисленным многофакторным условиям отвечают структурированные буферные жидкости. С соблюдением требований принципа «тандема технологий», а именно обеспечения максимальной совместимости с типичными промывочными жидкостями и тампонажными материалами, разработана стабилизированная структурированная буферная смесь, наиболее полно адаптированная к горно-геологическим и технико-технологическим условиям сооружения скважин в хемогенных отложениях Днепровско-Донецкой впадины. Требованиям обеспечения качественного цементирования обсадной колонны в условиях хемогенных отложений сполна отвечают определённые технологические параметры буферных смесей и гидродинамически обоснованные мероприятия процесса подготовки ствола скважины к креплению.

Полученные результаты лабораторно-промышленных и аналитических исследований являются базовыми для проектирования режимных параметров процесса цементирования обсадной колонны с гарантированным обеспечением высоких технико-экономических показателей. Данные по изучению процесса шламонакопления хемогенных отложений являются исходными положениями для обоснования конструктивных и технологических параметров устройств для создания осевого движения промывочной жидкости в кавернозных зонах скважины.

Ключевые слова: буферная смесь, хемогенные отложения, каверна, цементный камень, крепление скважин, условия бурения.

Література

1. Коцкулич Я.С., Тищенко О.В. Закінчування свердловин. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 366 с.
2. Ставычний Е.М. Опыт крепления скважин в хемогенных отложениях, склонных к пластической деформации (на примере нефтегазовых месторождений Днепровско-Донецкой впадины) // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – № 12. – С. 32– 7
3. Ігнатов А.А. Характеристика рабочих параметров устройства по подготовке скважин к креплению // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – № 4. – С. 82–86.
4. Ставичний Є.М., Ігнатов А.О. Особливості кріплення стовбура свердловини у хемогенних відкладах // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент–техника и технология его изготовления и применения. Вып. 22. – К.: Изд–во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2019. – С. 164–174.
5. В.А. Tereshak, J.M. Stavichny, M.M. Plytus et al. Buffer Plugging Systems // SWORLD. Технические науки.– 2014. Вып. 4.— С. 62 – 71.
6. Здоров Ф.Г., Нижник А.Е. О влиянии цементирования на фильтрационную характеристику продуктивных пластов // Нефтяное хозяйство. – 1978. – № 10. – С. 26 – 28.

7. Пат. 114761 Україна МПК E21B 47/00 (2006.01). Стенд для дослідження аерогідродинамічних потоків / О.М. Давиденко, А.О. Ігнатов, С.Ю. Дворник. – Заявл. 25.07.2017; Опубл. 25.07.2017, Бюл. № 9.
8. Ігнатов А.А. Исследование параметров процесса удаления глинисто-шламовых образований из кавернозных зон скважин // *Mining of Mineral Deposits*. – 2016. – Вып. 1. – С. 63–68.
9. Пат. 70694 Україна, МПК E21B 33/128. Стабілізована буферна суміш / Тершак Б.А., Ставичний Є.М., Сук Ю.Г. – Заявл. 17.11.2011; Опубл. 25.06.2012, Бюл. №12.
10. Ставичний Є.М. Оптимізація складів тампонажних систем // *SWORLD*. Технические науки. – 2015. – Вып. 1. – С. 8–12.
11. Ігнатов А.А. Аналитическое исследование механизма действия устройства очистки ствола скважины // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Вып. 18 – К.: Изд-во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2015. – С. 74–78.

Надійшла 09.07.20

References

1. Kotskulych, Ya.S., & Tyshchenko, O.V. (2004). *Zakinchuvannia sverdlovyh [Well completion]*. Kyiv: Interpres LTD [in Ukrainian].
2. Stavychnyi, Ye.M. (2014). Opyt krepleniya skvazhin v hemogennyh otlozheniyah, sklonnyh k plasticheskoy deformatsii (na primere neftegazovyh mestorozhdenij Dneprovo-Donckoy vpadiny) [Experience of fastening of bore holes in chemogenic sedimentations apt to the flowage (on the example of oil and gas deposits of the Dnepr-Donetsk cavity)]. *Stroitelstvo neftyanyih i gazovyih skvazhin na sushe i na more - Building of petroleum and gas bore holes on land and at the seaside*, 12, 32–37 [in Russian].
3. Ihnatov, A.A. (2016). Harakteristika rabochih parametrov ustroystva po podgotovke skvazhin k kreplenyu [Description of operating parameters device on preparation well to fastening]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgical and mining industry*, 4, 82–86 [in Russian].
4. Stavychnyi, Ye.M., & Ihnatov, A.A. (2019). Osoblyvosti kriplennia stovbura sverdlovyh u khemohennykh vidkladakh [Fastening features barrel of bore hole in chemogenic deposits]. *Porodorazrushayushiy i metalloobrabatyvayushiy instrument–tehnika i tehnologiya ego izgotovleniya i primeneniya – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 22, 164–174 [in Ukrainian].
5. Tershak, B.A., Stavichny, J.M., & Plytus M.M. et al. (2014). Buffer Plugging System. *Sworld*, 4, 37, 62–71.
6. Zdorov, F.G., & Nizhnik A.E. (1978). O vliyanii tsementirovaniya na filtratsionnyu harakteristiku produktivnyh plastov [About cementation influence on filtration description of productive beds]. *Нефтяное хозяйство – Oil economy*, 10, 26–28 [in Russian].
7. Davidenko O.M., Dvornik S. Yu., & A.A. Ihnatov (2017). Patent of Ukraine 114761 [in Ukrainian].
8. Ihnatov, A.A. (2016). Issledovanie parametrov processa udaleniya glinisto-shlamovyh obrazovaniy iz kavernozyh zon skvazhin [Research into parameters characterizing the process of withdrawing clay-mud formations from bore hole vuggy zones]. *Mining of Mineral Deposits*, 1, 10, 63– 8 [in Russian].
9. Tershak B.A., Stavychnyi, Suk Yu. H. (2012). Patent of Ukraine 70694 [in Ukrainian].
10. Stavychnyi, Ye.M. (2015). Optymizatsiia skladiv tamponazhnykh system [Compositions jptimization of the tamponing systems]. *Sworld*, 1, 1, 8–12 [in Ukrainian].

11. Ilnatov, A.A. (2015). Analiticheskoe issledovanie mehanizma deystviya ustroystva ochildki stvola skvazhinyi [Analytical research action mechanism device for cleaning of barrel of bore hole]. *Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*, 18, 74–81 [in Russian].

УДК 550.822:622.648.2

DOI: 10.33839/2708-731X-23-1-103-114

Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов, кандидати технічних наук

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49027, м. Дніпро, Україна, E-mail: koroviaka.ye.a@ntu.one*

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОТРАНСПОРТУ ЗНІМНИХ КЕРНОПРИЙМАЧІВ

Конструктивний вибір та обґрунтування ефективної технічної та технологічної схем забійної циркуляційної ланки бурильної колони та знімного керноприймача, що забезпечують сталість процесу поглиблення свердловини з високою мірою продуктивності і економічності.

Лабораторними і аналітичними прийомами досліджено особливості динаміки циліндричних контейнерів в потоці очисного агента за умов створення зворотної схеми циркуляції та визначено швидкості відносного руху при переміщенні керноприймачів змінних довжини та діаметру в циркуляційному каналі свердловини.

На підставі ґрунтового аналізу методики визначення швидкості відносного руху циліндричних контейнерів у внутрішньому каналі бурильної колони визначено відповідну математичну модель, яка повністю характеризується вихідним фактором – середньою швидкістю потоку промивальної рідини в трубі. З урахуванням обмежувальних умов при гідравлічних розрахунках циркуляційної системи свердловини встановлено, що швидкість керноприймача-контейнера по висхідній магістралі можна визначити, вирішивши систему рівнянь, що регламентує перепади тисків, необхідних для утримання його в зваженому стані. Вивчено вплив геометричних розмірів транспортної магістралі, діаметру і довжини керноприймачів-контейнерів на швидкість їх відносного руху. Безперерійність процесу транспортування знімних керноприймачів-контейнерів забезпечується цілком визначеними інтервалами раціональних співвідношень геометричних розмірів транспортної магістралі та самих контейнерів.

Отримані результати досліджень є базовими для проектування раціональної гідравлічної програми очищення свердловин при застосуванні схеми транспортування знімних керноприймачів-контейнерів потоком рідини. Отримані математичні залежності, що характеризують процес руху контейнерів, можуть бути покладені в основу конструювання та експлуатації комплексів технічних засобів для буріння із застосуванням знімних керноприймачів.

Ключові слова: *колона бурильних труб, гідравлічні опори, відносна швидкість, перепад тиску, динаміка, свердловина, гірська порода, керноприймач.*

Постановка проблеми

Розвідувальні бурові роботи – один з ефективних способів пошуків і розвідки родовищ корисних копалин; вони мають кардинальне значення для розвитку продуктивних сил країни, забезпечення галузей народного господарства необхідними мінерально-сировинними ресурсами, для раціонального розміщення промислових підприємств [1]. Геологорозвідувальні роботи проводяться з моменту отримання перших відомостей про прояв корисних копалин і закінчуються з повною його виїмкою. Процес дослідження і освоєння родовища ставить перед геологічною розвідкою ряд задач, які і визначають характер окремих видів розвідувальних робіт. До них відносяться пошуки і розвідка корисної копалини. Пошукові роботи включають відшукування родовища, визначення його промислового значення, з'ясування технічних і економічних умов майбутніх розвідувальних робіт, вибір методу