

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТАМПОНАЖНИХ СУСПЕНЗІЙ ДЛЯ КРІПЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН

Б.А.Тершаак

*Науково-дослідний і проектний інститут ВАТ «Укрнафта»,
76019, м. Івано-Франківськ, Північний бульвар ім. О.Пушкіна, 2, тел. (0342) 776137,
e-mail: t e r s h a k @ n d p i . u k r n a f t a . c o m*

Розглянуто досвід застосування різноманітних цементів для кріплення свердловин. Показано невідповідність типу і властивостей тампонажних матеріалів гірничо-геологічним особливостям нафтогазових родовищ України. Показано перспективні напрямки модифікування базового цементу відповідно до термобаричних та техніко-технологічних вимог операції цементування. Наведено результати контролю якості цементного каменя, сформованого з активованих, пластифікованих, дисперсно-армованих і стабілізованих матеріалів. За допомогою сучасних методів дослідження вивчено структуру та компонентний склад модифікованих композицій.

Ключові слова: заколонний простір, кріплення свердловини, цементний камінь, модифікація матеріалу.

Рассмотрен опыт применения различных цементов для крепления скважин. Показано несоответствие типа и свойств тампонажных материалов горно-геологическим особенностям нефтегазовых месторождений Украины. Показаны перспективные направления модификации базового цемента согласно термобарических и технико-технологических требований операции цементирования. Приведены результаты контроля качества цементного камня, сформированного из активированных, пластифицированных, дисперсно-армированных и стабилизированных материалов.

Ключевые слова: заколонное пространство, крепь скважины, цементный камень, модификация материала.

The experience of different cements of wells support is studied. Discrepancy of type and properties of the plugging materials for mining and geological features of oil and gas fields of Ukraine is displaying. Showing promising directions of cement base modification under temperature and pressure, and technical and technological requirements of cementing operations. Results of quality control of cement stone formed from the activated, plasticized, dispersion-reinforced and stabilized materials are given.

Keywords: bore hole annulus, well support, plugging material, drilling mud

Тампонажні суспензії вже друге століття залишаються базовим матеріалом, що застосовується в практиці кріплення глибоких свердловин на нафту і газ. Особливо це відчутно на пострадянському просторі, де, на жаль, наука та практика зупинились на рівні 70-80 років ХХ століття, коли були розроблені основні типи тампонажних цементів – аналоги нинішніх ПЦТ І-50, ПЦТ І-100, ПЦТ ІІ-Пол 5-100, ПЦТ ІІ-Пов-100, ШПЦС-120, ШПЦС-200 тощо та апробовані типові модифікуючі домішки. Мабуть, єдиним виключенням є розширювальні тампонажні суміші РТМ-50, РТМ-75 та РТМ-120 виробництва НВП «Спецматеріали». Що ж стосується нашої країни, то, як свідчить практика будівництва свердловин, за останні десятиліття ми бачимо більше регресу, ніж прогресу. В структурі річного обсягу основної продукції підприємств цементної промисловості України (близько 14 млн. тонн на рік) частка тампонажного цементу не перевищує 0,3%. Зростання ринку будівельних матеріалів не спонукає цементників до виготовлення високоякісних спеціальних тампонажних матеріалів. Крім того, слід очікувати суттєвого здорожчання останніх. Наприклад, відпускні ціни на цемент ПЦТ І-50 ОАО «Сухоложскцемент» (Росія) за останні 14 місяців виросли майже втричі.

Аналіз засвідчує, що тампонажні матеріали, які використовуються для цементування

глибоких свердловин нафтогазових родовищ України, у своїй більшості не відповідають умовам їх застосування. Простежимо це на прикладі кріплення свердловин нафтових родовищ Передкарпаття відповідно у 1981 р. та 2006 р. Як бачимо з рис. 1, незважаючи на загальновідому тенденцію щодо ускладнення термобаричних умов, характерну для більшості нафтогазових родовищ ВАТ «Укрнафта», за 25 років відбулось стрімке падіння обсягів застосування спеціального цементу (полегшеного) у понад 2,5 рази, поважненого – у 9,8 рази, високотемпературних – у понад 8,1 рази. Натомість споживання цементу марок ПЦТ І-50, ПЦТ І-100 збільшилось від 71,95% до 94,79%. Така ситуація викликана низкою причин, серед яких визначальними є особливості процедури організації тендерних закупівель у нашій країні.

Для всіх нафтогазових регіонів України характерне ускладнення умов проведення бурових робіт, насамперед – через великі глибини, складну просторову архітектуру стовбура свердловини, аномальні термобаричні умови, хомогенні відклади, наявність порід схильних до пластичної деформації, різноманітність умов застосування і т.п. Все це ставить дуже жорсткі вимоги до технологічних властивостей тампонажних матеріалів.

Відомо [1], що основні з них: міцність, проникність та довговічність цементного ка-

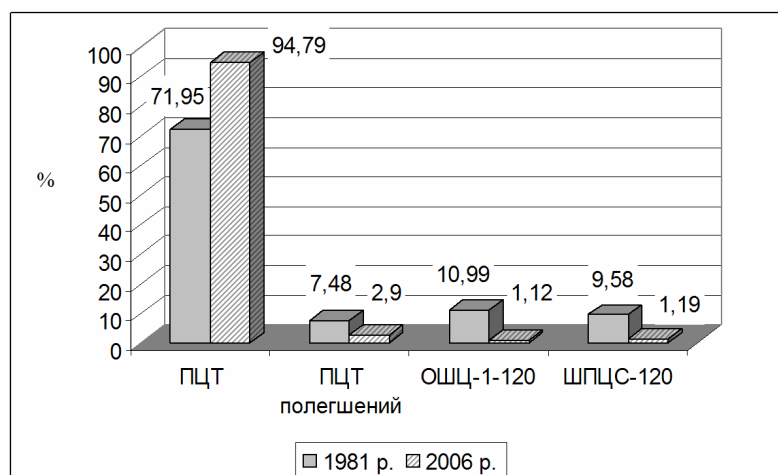


Рисунок 1 – Динаміка застосування тампонажних цементів на родовищах Передкарпаття

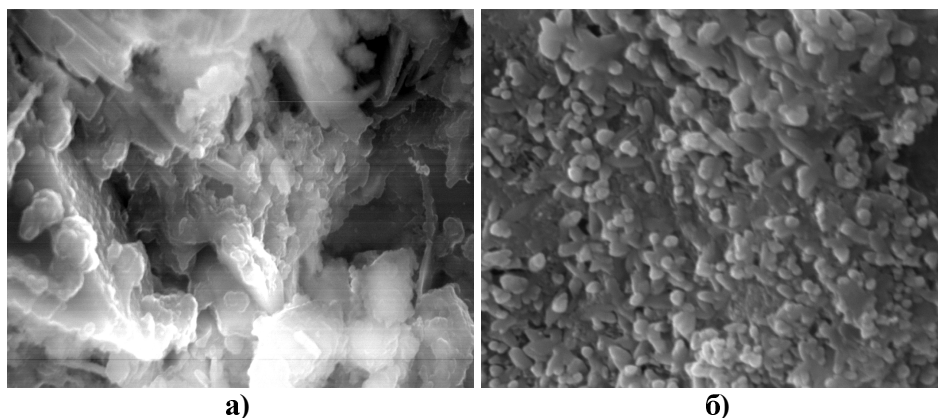
Таблиця 1 – Порівняльні властивості тампонажних суспензій

Властивості тампонажних розчинів	Умови дослідження					
	Т=75°С ; Р=30 МПа			Т=100°С ; Р=30 МПа		
	ПЦТ-І-100	«Злежаний» ПЦТ-І-100	Активований зі «злежаного» ПЦТ-І-100	ШПЦС-120	«Злежаний» ШПЦС-120	Активований зі «злежаного» ШПЦС-120
Густина, кг/м ³	1820	1820	1820	1760	1760	1760
Водоцементне відношення	0,5	0,5	0,5	0,45	0,45	0,45
Розтічність, мм	205	210	235	215	220	240
Початок тужавіння, Т _{пт.} , год-хв	1-23	1-44	1-19	1-15	1-20	1-05
Терміни схоплення: початок	1-52	2-27	1-37	1-34	1-51	1-26
кінець	2-31	2-53	1-51	1-52	2-23	1-50
Т _{зар} /Т _{пт.}	0,74	0,70	0,82	0,74	0,72	0,80
Водовідділення, %	2,1	2,9	1,3	4,3	5,1	2,3
Водовіддача по УВЦ-1, см ³ /30хв	213	227	154	257	274	193
Напруження зсуву, МН/м ²	0,73	0,64	0,77	0,39	0,337	0,43
Газопроникність каменя через 48 год, мкм 10 ⁻³	0,61	0,83	0,097	3,92	4,36	0,31
Міцність, МН/м ² : на вигин	6,34	4,38	6,93	1,71	1,41	1,97
на стиск	19,3	16,4	20,4	11,34	9,96	13,4

каменя – залежать від характеристик вихідного в'язучого матеріалу. Так, наприклад, добрими структуроутворюючими властивостями володіють кристали з високим ступенем дисперсності та анізодіаметричністю форми, здатні до утворення фазових контактів зростання. Звідси, здавалось би, найпростіше рішення лежить на поверхні. Більша дисперсність сприятиме зміні характеру формування цементної суспензії, прискорить темпи загуснення та тверднення за рахунок підвищення швидкості утворення кристалізаційної структури, забезпечить інтенсивне зростання початкової міцності каменя. Однак такий підхід економічно та технологічно невиправданий, оскільки призводить до зниження продуктивності млинів, підвищення вартості цементу а, найважливіше, – втрати ним

активності під час транспортування та зберігання. Наприклад, за питомої поверхні понад 350-450 м²/кг навіть за сприятливих умов зберігання цементу протягом місяця міцність каменя знижується на 15-20%. Тому доцільніше використовувати тампонажні матеріали з оптимальною питомою поверхнею 250-300 м²/кг, передбачивши можливість подальшої активації останніх під час застосування [2].

Для цього за нашою участю розроблено метод активації, що базується на гідродиспергуванні попередньо структурованих у вибійних умовах суспензій, та розроблено пристрій [3] для його реалізації. Це дає змогу покращити основні технологічні властивості суспензії порівняно з контрольними зразками (табл. 1).



а) базовий цемент ПЦТ І-100; б) цемент ПЦТ І-100 з добавкою 10 % Microsilica

Рисунок 2 – Мікроструктура цементного каменя

Як бачимо, після руйнування первинних несформованих контактів та формування гранично зруйнованої структури на 20-30 хвилин у 2-3 рази знижується консистенція розчину та підвищується його розтічність із 200-210 до 235-240 мм, що сприятиме більш якісному заповненню суспензії заколонного простору. В подальшому за рахунок розблокування плівок гідратних новоутворень на зернах цементу, гідратація активованих розчинів починає різко інтенсифікуватись. Спостерігається прискорений перехід в'язучого до третьої стадії структуроутворення. При цьому строки початку тужавіння скорочуються на 25-30%. Згідно з табл. 1 інкубаційний період структуроутворення в активованих сумішей скорочується на 30-40%. У результаті інтенсивної гомогенізації суспензії та зв'язування вільної рідини в суспензії стабільність останньої зростає. Водовіддача розчину зменшується в 1,5 рази.

Підвищується міцність та знижується газопроникність каменя, причому приріст міцності особливо інтенсивний на ранній стадії тужавіння. Так, через 12 годин тверднення міцність зразків із активованої суміші майже на 60% вища, ніж у контрольних зразків із “злежаного” цементу. За 24 години ОЗЦ збільшення міцності становить 50%. Це дозволяє збільшити контактні напруження зсуву. Газопроникність цементного каменя із активованого ПЦТ-І-100 через 48 годин формування структури практично вдвічі нижча, ніж у контрольних зразків. Даний спосіб може бути ефективним для відновлення технологічних властивостей “злежаних” цементів, що особливо актуально у випадку масових тендерних закупівель матеріалів, проведення робіт у віддалених районах суші та шельфу морів [4].

Сьогодні в практиці будівництва і експлуатації свердловин застосовують надзвичайно потужні способи інтенсифікації припливу вуглеводнів. Серед останніх різноманітні імпульсні методи дії, здатні генерувати в гірських породах коливання (вібрацію). Накладаючись одна на одну, ударні хвилі формують у пористому середовищі колекторів нерівномірне поле тисків, під впливом якого відбувається очищення

пор від осаду, розширення і закріплення тріщин, регулювання реологічних властивостей пластових флюїдів тощо. На жаль, одночасно під впливом цієї силової дії перебуває і тампонажний матеріал.

Як бачимо з рис. 2 а, камінь, сформований з базового цементу ПЦТ-І-100 виробництва ВАТ «Волинь» (контрольний зразок), доволі неоднорідний, містить велику кількість рівновеликих пор. Для таких структур характерна низька довговічність, обумовлена перекристалізацією гідратних новоутворень, зокрема перетворення гексагонального гідроалюмінату (наприклад, C_4AH_9) на кубічний C_3AH_6 , а також коалесценція дрібних кристалів у більш крупні. Відомо, що коли локальна механічна напруга в деякій приповерхневій чи внутрішній області такого каменя перевищує границю міцності відповідної ділянки моноліту, утворюється тріщина, яка відтак стає новим концентратором наруг. Рух дефектів структури інтенсифікується, в результаті чого дрібні тріщини об'єднуються у великі магістральні, що в подальшому може призвести до зниження експлуатаційної надійності свердловини як інженерної споруди [5].

Покращенню ситуації може сприяти застосування дисперсно-армованих тампонажних матеріалів з мікроармувальними добавками. Останні, виконуючи роль мікроарматури, покращують однорідність матеріалу, технологічні показники суміші, насамперед міцнісні та деформативні властивості каменя, що особливо важливо на ранніх стадіях формування. Для цього можуть бути використані як штучні волокна (так звана мікрофібра), так і ниткоподібні кристали нітридів, карбідів кремнію, алюмінію, бору тощо.

Дослідженнями встановлено, що використання високодисперсних (1 кг матеріалу містить до 250 000 000) поліпропіленових волокон до 9 раз знижує мікропластичну усадку і тріщиноутворення під час тверднення розчину, зменшуючи розмір та кількість мікротріщин, що сприяє збереженню більшої внутрішньої міцності системи. Встановлено, що добавка поліпропіленових мікрволокон в кількості 0,02%

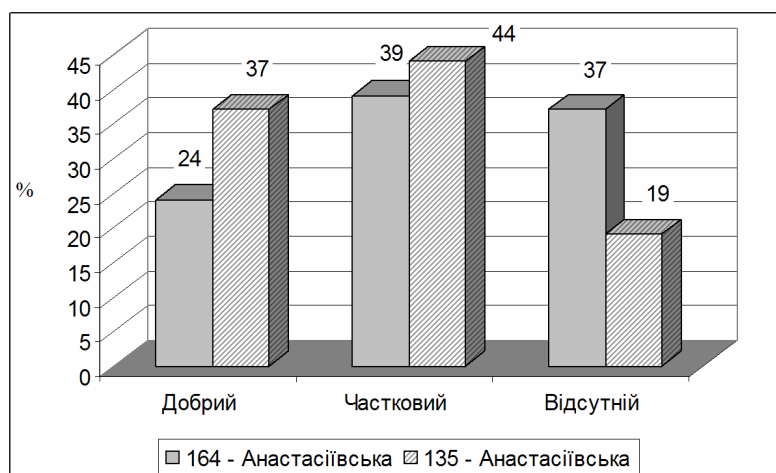
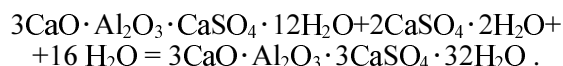


Рисунок 3 – Порівняльні результати цементування свердловин (за даними АКЦ)

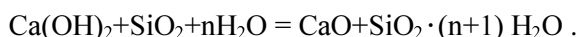
до маси цементу обмежує ефект контракції, забезпечує підвищення міцності та деформаційної стійкості сформованого каменя. Наприклад, міцність на вигин портландцементу (ПЦТ І-50, ПЦТ І-100, І-Г) зростає від 47% до 79%, спеціального цементу – від 87% до 104%. Натомість коефіцієнт крихкості зменшується в 1,3-1,7 рази. Останнє особливо важливе під час цементування похило-спрямованих та горизонтальних свердловин. З часом, коли камінь затвердів, пропіленові волокна з'єднують краї мікротріщин, тим самим знижуючи внутрішні напруження та ризик крихкого руйнування. Як бачимо, ефективність мікроармування залежить від типу базового цементу та особливостей приготування суміші. На даний час проведено успішні промислові випробування дисперсно-армованих тампонажних сумішей для цементування свердловин 835-Долинська, 83-Старосамбірська, 101-Василівська, 135-Анастасіївська, 340-Глинсько-Розбишівська та установа цементних мостів у свердловинах 148-Північно-Долинська та 11-Лопушнянська. Як бачимо (рис. 3), застосування тампонажного цементу ПЦТ І-100 з мікроармувальною добавкою пропіленового волокна (АрД) під час цементування у св. 135 Анастасіївська сприяло суттєвому покращанню якості робіт (за даними акустичної цементометрії) порівняно з базовим варіантом (бездомішковий цемент ПЦТ І-100) у св. 164 Анастасіївська. Так, кількість зон з добрим контактом каменя зросла від 24% до 37%, тоді як ділянок, де контакт відсутній, стало на 18% менше.

Підвищення довговічності каменя можливе також за рахунок керованого вирощування армувальних кристалів, забезпечуючи тим самим можливість до "самозаліковування" порушеної мікроструктури матеріалу. Свого часу В.В. Тимашовим та його школою визначено умови, у яких за рахунок керованого вирощування кристалів можливе отримання самоармуючих композитів, де роль матриці виконують гелеподібні, субмікрокристалічні та ізометричні кристалічні продукти гідратації, а як зміцнююча арматура виступають ниткоподібні ($l/d > 100$) або голкоподібні кристали новоутворень [6]. Наприклад, формування в'язучого гідросульфо-

алюмінатного твердіння (ГСА-твердіння) складу ($C_3A + CaSO_4$) з добавкою надлишкової кількості гіпсу $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ сприяє утворенню пластичного моногідросульфоалюмінату кальцію $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$, який, взаємодіючи з добавкою, утворює нову сполуку – волокнистий тригідросульфоалюмінат кальцію $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ чи еттрингіт. Формування останнього відбувається за схемою



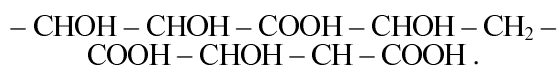
В силікатних системах під час гідратації мінералів цементного клінкера або вапняно-кремнеземистого в'язучого в присутності лужних чи лужноземельних катіонів (гідросилікати кальцію та змішані гідросилікати) волокнисті матеріали: ТШН, ксонотліт, фошагіт, гілебрандіт. Останні формуються у випадку додавання до базового портландцементу добавок кремнезему, який зв'язує гідрооксид кальцію, що виділяється при гідролізі мінералів портландцементу, з утворенням гідросилікату



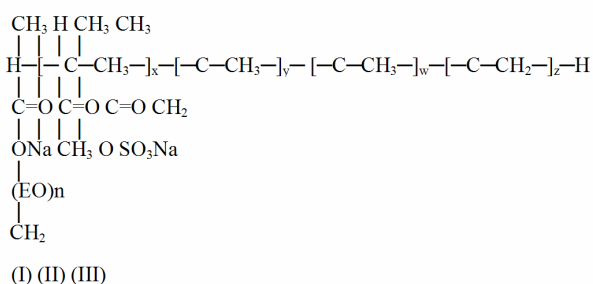
Серед найбільш перспективних добавок кремнезему є Microsilica – аморфний конденсований мікрокремнезем, побічний продукт виробництва феросиліцію, золь у вигляді мікроскопічних кульок (мікросфер) розміром 0,1-0,3 мкм. Сферична форма частинок забезпечує під час руху «ефект підшипника» та сприяє гомогенізації суміші, тоді як SiO_2 створює умови для перетворення нестабільного гідроксиду кальцію в кристалічний низько основний гідросилікат кальцію. За рахунок цього зростає щільність структури сформованого матеріалу, що забезпечує суттєве (20-85%) збільшення його міцності та корозійної стійкості. Вищеописаний характер формування порової структури і кінетика набору міцності пояснюється армуванням і самоармуванням цементного каменя низькоосновними гідросилікатами, що підтверджується проведеними електронно-мікроскопічними дослідженнями (рис. 2 б). При цьому ці кристали ростуть перпендикулярно до

поверхні в напрямку до поблизу розташованих зерен каменю, на поверхні яких також спостерігаються подібні кристали. Високодисперсні субмікроскопічні часточки Microsilica слугують центрами нуклеації та кристалізації, на яких відбувається осадження продуктів гідратації. Через 1 добу формування на поверхні частинок спостерігається хемосорбція з рідкої фази OH^- , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ . Отримані нами результати добре узгоджуються з висновками Larbi J.A., Vijen J.M. щодо мікроармування кремнеземом будівельного портландцементу [7,8].

Для забезпечення необхідних технологічних властивостей, насамперед прокачуваності тампонажного розчину, його зазвичай додатково обробляють хімічними реагентами – модифікаторами, які умовно можна поділити на дві групи. До першої належать речовини, здатні утворювати кліщоподібні комплексні сполуки (хелати) з активними центрами на поверхні частинок клінкера. Чим більше ланок має сполука у своєму ланцюгу, тим вища її здатність до гальмування гідратації в'язучого та регулювання реологічних властивостей суспензії. Зазвичай це органічні кислоти з будовою молекулярних ланцюгів



Другу групу складають водорозчинні полімери з транізомерійним ланцюгом будови макромолекули, за умови наявності в останній карбоксильних груп. Ці реагенти утворюють гідрофобну плівку навколо часток в'язучого, тим самим уповільнюючи процес дисоціації елементів клінкера. Їх активність залежить від співвідношення довжини макромолекули, її просторового розгалуження та стійкості речовини до лужної агресії. Серед останніх – добавки нового покоління на основі полікарбоксилатів (РС) – водорозчинні поверхнево-активні ланцюгові або сітчасті полімери та сополімери, синтезовані шляхом послідовної полімеризації мономерів карбоксильної (метакрилової) кислоти з макромолекулами виду



де E – $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-]$; (I) и (III) – ланки, відповідальні за взаємодію РС з поверхнею цементного зерна; (II) – ланка, що формує навколо частинки цементу електростатично заряджений екран та сприяє забезпеченню гомогенності суміші.

Добавка до тампонажних розчинів пластифікатора дозволяє без проблем отримувати тампонажні суспензії густиною до 2050 кг/м³ з покращеними реологічними властивостями та

суттєво скоротити обсяги застосування як спеціальних тампонажних цементів (ОЦГ, ОЩЦ, 1-G, 1-H тощо), забезпечити значну економію коштів. Наприклад, застосування пластифікованих тампонажних розчинів у свердловинах 14 Південно-Гвіздецька, 52 Росільнянська, 17 Рудівська забезпечило економію понад 500 тис. грн. На даний час пластифіковані тампонажні матеріали використано під час цементування понад 30 свердловин родовищ ВАТ «Укрнафта». Як засвідчують результати геофізичних досліджень, їх застосування дозволяє на 20-30% підвищити щільність контакту каменя з колоною, його міцність і корозійну стійкість і, як наслідок, збільшити міжремонтний період роботи свердловин.

Досвід провідних світових компаній свідчить, що одним із напрямків підвищення якості розмежування продуктивних пластів (особливо в похило-скерованих і горизонтальних свердловинах) є використання стабілізованих, седиментаційно-стійких тампонажних розчинів із пониженою водовіддачею. На жаль, на родовищах України здебільшого використовують нестабілізовані цементами, що призводить до відфільтровування значної кількості рідини замішування в проникні пласти, сприяє додатковому забрудненню порід-колекторів, а також передчасному структуроутворенню системи. Наприклад, під час цементування нижньої секції 245 мм проміжної колони в інтервалі 2610-1827 м свердловини 55 Ярошівська через відфільтрування частини незв'язаної води у високонепроникні пісковики відбулось передчасне загуснення тампонажного розчину з ПЦТ І-100. Як наслідок, прихоплено цементом 366,8 м допускних 127 мм бурильних труб. Затрати часу на ліквідацію ускладнення перевищили 319 діб, тоді як на буріння під проміжну колону усього 49 діб.

За результатами досліджень російських фахівців проф. А.І. Булатова, Ю.С. Кузнецова, П.В. Овчинникова, С.А. Рябоконея та їх учнів як реагенти – стабілізатори водовіддачі тампонажних систем ефективними добавками є високомолекулярні сполуки (ВМС) [1]. Серед останніх найперспективнішими є добавки оксигетилцелюлози (ОЕЦ) – продукту реакції целюлози з окисом етилену в присутності катализатора – NaOH. За результатами досліджень, виконаних в НДПІ ВАТ «Укрнафта», розроблено рецептури стабілізованого тампонажного розчину на основі базових цементів ПЦТ І-100, 1-G, ШПЦС-120 з добавками ОЕЦ відповідно німецького (mylose) та російського (сульфацел-2) виробництва. Застосування вказаних матеріалів у кількості 3-5 кг на 1 м³ тампонажного розчину зменшує його водовіддачу від 8 до 30 разів, а водовідділення – у 2-12 разів. Крім того зростають міцність та адгезія цементного каменя.

Таким чином, наведений оглядовий аналіз перспективних напрямків модифікування базових тампонажних матеріалів відповідно до особливостей буріння свердловин нафтогазових родовищ України свідчить про можливість кількох напрямків підвищення експлуатаційної

Література

надійності за колонного простору кріплення свердловин. Очевидно, що використання тієї чи іншої тампонажної композиції визначається, насамперед, умовами цементування. Однак слід пам'ятати, що максимальний ефект досягають тільки у разі комплексного підходу до вирішення цієї складної проблеми, забезпечивши оптимальні: підготовку свердловини до процесу кріплення, технологічне оснащення обсадної колони, рецептури тампонажних матеріалів, буферних рідин, а також процес цементування колон і формування каменя. Успішна реалізація в промислових умовах складних технологій і матеріалів вимагає кваліфікованого наукового та інженерно-технологічного супроводу.

1 Булатов А.И. Формирование и работа цементного камня в скважине / А.И. Булатов. – М.: Недра, 1990. – 408 с.

2 Вагнер Г.Р. Физико-химия процессов активации цементных дисперсий / Г.Р. Вагнер. – К.: Наукова думка, 1980. – 200 с.

3 А.с. 1460203 СССР, МКИ Е 21 В 33/14. Струйный гидродиспергатор. / Б.А. Тершак, С.И. Шигаев, Н.М. Пазяк, А.Б. Скочеляс, И.И. Наритник. – № 4069859; заявл. 07.04.1986; опубл. 23.02.1989

4 Тершак Б.А. Особенности гидратации активированных тампонажных материалов / Б.А. Тершак // Фізика і хімія твердого тіла. – 2007. – Т. 8, № 4. – С. 821-827

5 Горський В.Ф. Тампонажні матеріали і розчини: посібник-монографія / В.Ф. Горський. – Чернівці, 2006. – 524 с.

6 Тимашев В.В. Избранные труды. Синтез и гидратация вяжущих материалов / В.В. Тимашев. – М.: Наука, 1986. – 424 с.

7 Larbi J.A., Bijen J.M. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems / J.A. Larbi, J.M. Bijen // Cem. and Concr. Res. – 1990. – V20. – 4. – P.506-516.

8 Larbi J.A., Bijen J.M. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems / J.A. Larbi, J.M. Bijen // Cem. and Concr. Res. – 1990. – V20. – №5. – pp.783-794.

*Стаття поступила в редакційну колегію
20.01.10*

*Рекомендована до друку професором
Я. С. Коцкуlichem*