

## ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗМЕЖУВАННЯ ПЛАСТІВ З АНОМАЛЬНО НИЗЬКИМИ ТИСКАМИ

<sup>1</sup>М.В. Сенюшкович, <sup>1</sup>І.М. Ковбасюк, <sup>1</sup>О.Б. Марцинків, <sup>1</sup>І.І. Витвицький, <sup>2</sup>В.І. Забіяка

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727137,  
e-mail: [drill@nung.edu.ua](mailto:drill@nung.edu.ua)

<sup>2</sup>ТОВ «Укр СКС»; 03680, м. Київ, пр-т Академіка Палладіна, 34, тел. (044) 3831549,  
e-mail: [newtechnology@sks-gk.com](mailto:newtechnology@sks-gk.com)

За останні роки значно розширився асортимент тампонажних матеріалів, розроблено і розпочато виробництво нових видів цементів для тампонування нафтових і газових свердловин. Розширилися і поглибилися знання про склад, властивості та природу процесів тужавіння і твердіння тампонажних матеріалів, особливо з можливістю використання нових методів і приладів для їх дослідження і моделювання найрізноманітніших умов.

Проаналізовано можливість використання полегшених тампонажних розчинів на основі бентонітових глин і кремнеземистих порід для розмежування пластів у нафтових і газових свердловинах. Обґрунтовано вимоги, які ставляться до фізико-механічних властивостей полегшених домішок. Подано рекомендації щодо отримання якісного тампонажного каменю при використанні полегшених тампонажних розчинів. Проведено лабораторні дослідження з визначення основних показників полегшених тампонажних розчинів на основі ОТМ-5 і гелцементу і тампонажного каменю, сформованого з них. На основі порівняльного аналізу гелцементної суміші з сумішшю ОТМ-5 видно, що використання тампонажного матеріалу ОТМ-5 для приготування полегшених розчинів є доцільнішим.

Ключові слова: тампонажний матеріал, седиментаційна стійкість, міцність, водовідділення, проникність, корозійна стійкість

За последние годы значительно расширился ассортимент тампонажных материалов, разработано и начато производство новых видов цементов для тампонирования нефтяных и газовых скважин. Расширились и углубились знания о составе, свойствах и природе процессов схватывания и твердения тампонажных материалов, особенно, с возможностью использования новых методов и приборов для их исследования и моделирования разнообразных условий.

Проанализирована возможность использования облегченных тампонажных растворов на основе бентонитовых глин и кремнеземистых пород для разобщения пластов в нефтяных и газовых скважинах. Обоснованы требования, предъявляемые к физико-механическим свойствам облегченных добавок. Даны рекомендации к получению качественного тампонажного камня при использовании облегченных тампонажных растворов. Проведены лабораторные исследования по определению главных показателей облегченных тампонажных растворов созданных на основании ОТМ-5 и гелцементной смеси, а также сформированного с них тампонажного камня. По результатам сравнительного анализа гелцементной смеси со смесью ОТМ-5 видно, что использование тампонажного материала ОТМ-5 для приготовления облегченных растворов является более целесообразным.

Ключевые слова: тампонажный материал, седиментационная устойчивость, прочность, водоотделение, проницаемость, коррозионная стойкость

For last years has considerably expanded the range of plugging materials, developed and brought into production new types of cement for tamping of oil and gas wells. Widened and deepened knowledge of composition, properties and nature of the processes of setting and hardening of plugging materials, especially, with the possibility of using new methods and devices for their research and modeling of various conditions.

Possibility of using of lightweight cement slurries on the basis of bentonitic clays and siliceous rocks for formation isolation of oil and gas wells was analyzed. The requirements that are put to physical and mechanical properties of the lightweight additives were grounded. Recommendations for obtaining qualitative cement stone when using lightweight cement slurries were suggested. Laboratory tests to determine the main characteristics of lightweight cement slurries on the basis of OTM-5, gel-cement, and cement stone, made of them, were carried out. The comparative analysis of the gel-cement mixture and OTM-5 mixture showed that the use of the OTM-5 plugging material for the lightweight slurries preparation was more efficient.

Key words: plugging material, sedimentation resistance, durability, water segregation, permeability, corrosion resistance.

Свердловини нафтогазових родовищ України характеризуються широким діапазоном температур, пластових тисків, наявністю зон поглинання тощо. Така різноманітність геологічних умов у практиці буріння і кріплення свердловин потребує використання цілого ряду спецементів і тампонажних сумішей з різними технологічними характеристиками.

В даний час для тампонування свердловин найчастіше базовими вважаються портландцементи. Однак, часто у свердловинах виникають такі умови, коли використання портландцементів неможливе і надійне розмежування пластів можна забезпечити тільки завдяки використанню спеціальних тампонажних матеріалів. Зага-

лом якісне розмежування пластів для умов конкретної свердловини залежить насамперед від:

- правильної вибору типу тампонажних матеріалів, які б найповніше відповідали специфічним умовам свердловини;
- складу суміші і рецептури тампонажного розчину;
- режиму формування тампонажного каменя та його властивостей.

Змінилась нормативно-технічна документація, що стосується виробництва, випробування та використання тампонажних матеріалів, а також вимоги до якості і технології виконання тампонажних робіт. Проведені дослідження і досягнуті результати у сфері застосування тампонажних матеріалів сформувались у самостійний науковий напрямок.

До спеціальних тампонажних матеріалів належать і полегшені тампонажні розчини, які використовують для тампонування розрізів свердловин з аномально низькими пластовими тисками, або розрізів, складених схильними до поглинання чи гідророзриву породами. Вид та склад тампонажного матеріалу безпосередньо впливає на якість розмежування пластів і, як наслідок, на ефективність та тривалість роботи свердловини без потреби виконання ремонтно-ізоляційних робіт. Тому тампонування свердловин з використанням полегшених тампонажних розчинів повинно не тільки запобігти можливим ускладненням під час виконання робіт, але й забезпечити формування якісного та надійного кріплення свердловин. Для якісного цементування необхідно підбирати склади тампонажних матеріалів в залежності від конкретних умов у свердловині. При цьому необхідно враховувати такі чинники:

- а) ступінь заповнення кільцевого простору свердловини тампонажним розчином;
- б) відмінність у складах тампонажного розчину, приготовленого в лабораторних та виробничих умовах;
- в) ступінь невідповідності виробничих умов лабораторним;
- г) вимоги до довговічності та надійності роботи тампонажного каменя.

Тампонажні розчини – це багатокомпонентні системи, густина (об'ємна маса) яких залежить від густини вихідних компонентів та їх об'ємного (або масового) співвідношення в суспензії. Зменшити густину тампонажного розчину можна підвищенням вмісту рідини замішування відносно твердих компонентів, тобто збільшенням водоцементного відношення за умови, що густина рідини менша за густину компонентів. Але такий спосіб використовується вкрай рідко через погіршення седиментаційної стійкості тампонажних розчинів, збільшення термінів їх тужавіння, підвищення пористості тампонажного каменя, зменшення його механічної міцності та корозійної стійкості. Тому доцільно понижувати густину тампонажного розчину за рахунок:

- заміни частини або всієї рідини замішування рідиною меншої густини;

- заміни всієї або частини в'язучої речовини в'язучою речовиною меншої густини;
- заміни всієї або частини домішки домішкою меншої густини;
- заміни частини в'язучої речовини спеціальною домішкою меншої густини;
- заміни частини об'єму твердих і (або) рідких фаз на газоподібну фазу.

Вибір того чи іншого способу пониження густини тампонажного розчину залежить від умов його застосування, технічних можливостей підприємства, вимог до якості розмежування пластів і кріплення свердловини та економічної доцільності. У разі використання тампонажних матеріалів на основі мінеральних в'язучих речовин можливості регулювання густини розчину вибором їх виду обмежені, якщо брати до уваги тільки густину цих речовин.

Дослідженнями, проведеними авторами [1, 2] було встановлено, що за необхідності понизити густину тампонажного розчину, при готованого на основі портландцементу, з  $1830 \text{ кг/м}^3$  при водоцементному відношенні 0,5 до  $1500 \text{ кг/м}^3$  можна скористатись різними методами. У першому випадку цього можна досягти шляхом заміни 90% портландцементного клінкера на найлегшу з мінеральних домішок – пилоподібну золу, у другому – замінити 46% клінкера на порошкоподібне кам'яне вугілля, в третьому випадку – додати до розчину 20% газової фази від початкового його об'єму; і, останнє, – збільшити водовміст до 1,05. За результатами аналітичних та експериментальних досліджень оцінювалась міцність тампонажного каменя у кожному випадку через дві доби твердіння та на його кінцевій стадії і зроблено такі висновки.

1. Для отримання густини тампонажного розчину в межах  $1500 \text{ кг/м}^3$  необхідно ввести настільки багато золи, що він практично не твердіє. Тому з використанням таких домішок найдоцільніше понижувати густину розчину тільки до  $1700 \text{ кг/м}^3$ , але і в цьому випадку отримують тампонажний камінь низької міцності.

2. Якщо використовувати домішки органічного походження густиною  $1300 \div 1400 \text{ кг/м}^3$ , то можна приготувати розчини густиною  $1500 \text{ кг/м}^3$ , які твердіють до утворення тампонажного каменя низької, але, в багатьох випадках, достатньої міцності. Якщо як домішки використовувати матеріали густиною  $900 \div 1000 \text{ кг/м}^3$  (наприклад поліетиленову крихту), то розчин густиною  $1500 \text{ кг/м}^3$  можна отримати при заміні близько 25 % клінкера, але міцність тампонажного каменя тоді низька і близька до міцності, що досягається у випадку збільшення водовмісту розчину.

3. Більшу міцність тампонажного каменя при пониженні густини розчину отримують введенням в останній повітря. Суттєвою вадою аерованих тампонажних розчинів є їх стискуваність. На глибинах, де високі гідростатичні тиски, об'єм аерованого тампонажного розчину суттєво зменшується, а густина збільшується. Цю ваду можна усунути, якщо пухирці повітря чи іншого газу помістити в міцні оболонки.

Найчастіше використовуються пластмасові, скляні, керамічні та кварцові мікро-балони (мікро-капсули). Для ефективного пониження густини тампонажного розчину зі збереженням високої міцності каменя необхідно, щоб густина мікробалонів знаходилась в межах  $600 \text{ кг/м}^3$ . Тоді для отримання тампонажного розчину густиною  $1500 \text{ кг/м}^3$  достатньо замінити ними 14% маси портландцементного клінкера. Міцність тампонажного каменя в такому разі достатньо висока. Такий спосіб дозволяє приготувати тампонажні розчини низької густини зі збереженням задовільних властивостей каменя. Так, замінивши мікробалонами тільки 25% маси портландцементного клінкера (за незмінного водовмісту) можна отримати тампонажний розчин густиною  $1200 \text{ кг/м}^3$ , а міцність каменя буде близькою до міцності при густині розчину  $1500 \text{ кг/м}^3$  з поліетиленовою крихтою. Подальший резерв підвищення міцності тампонажного каменя полягає у застосуванні мікробалонів з шорсткою (кавернозною) поверхнею. Однак, це неможливо суміщати з їх низькою густиною, оскільки для цього необхідна більша товщина оболонки. Але такі частинки густиною  $800\div 1000 \text{ кг/м}^3$  утворюють спінені керамічні матеріали (керамзит, аргіліт) при розмірі зерен біля  $1 \text{ мм}$ . Для отримання розчину густиною  $1500 \text{ кг/м}^3$  достатньо замінити спініним аргілітовим піском 25% портландцементного клінкера. При цьому зберігається доволі велика міцність тампонажного каменя.

Таким чином, для пониження густини тампонажного розчину:

- до густини  $1650\div 1700 \text{ кг/м}^3$  доцільно використовувати всі відомі способи;

- до густини  $1400\div 1600 \text{ кг/м}^3$  доцільно застосовувати полегшуючі домішки густиною менше  $2000 \text{ кг/м}^3$ , підвищувати водовміст, а на невеликих глибинах також використовувати аерування розчину;

- до густини нижче  $1400 \text{ кг/м}^3$  бажано використовувати порожні або газонаповнені мікробалони.

Підвищення водовмісту звичайної портландцементної суспензії неминуче призводить до погіршення її седиментаційної стійкості. При водоцементному відношенні  $0,55$  проявляється помітне водовідділення, яке при  $0,6$  досягає недопустимих значень. Швидкість фільтрації рідини через суспензію можна зменшити, підвищивши в'язкість рідини та ступінь дисперсності твердої фази. Ці обидва прийоми використовують для приготування тампонажних розчинів із високим водовмістом.

Для підвищення в'язкості рідкої фази у воді розчиняють ефіри целюлози, препарати на основі крохмалю, акрилатів і т.п. Додаючи достатньо велику кількість таких домішок можна досягнути водоцементного відношення, рівного одиниці зі збереженням необхідної водоутримуючої здатності тампонажного розчину. Вада цього методу – значне сповільнення термінів тужавіння, яке важко компенсувати прискорювачами. Ефективнішим є додавання до складу тампонажного розчину спеціального дрібнодисперсного компонента, який адсорбує на своїй поверхні надлишкову, у порівнянні з допустимою, кількість води.

сперсного компонента, який адсорбує на своїй поверхні надлишкову, у порівнянні з допустимою, кількість води.

Такий дрібнодисперсний компонент (наприклад, гідросилікат кальцію) можна отримати безпосередньо у рідині замішування в результаті хімічної реакції молекулярних розчинів ортосилікату натрію і хлористого кальцію. Подібні дрібнодисперсні осади можна отримати з алюмінату натрію та інших солей. Використання зазначених способів дозволяє понизити густину портландцементного розчину до  $1600 \text{ кг/м}^3$ .

Значно частіше дрібнодисперсні домішки, які фізично зв'язують додатково введену для пониження густини розчину воду, використовують у вигляді дрібнодисперсних порошків, змішуючи їх з базовим тампонажним матеріалом або водою замішування. Ці домішки головним чином перешкоджають седиментаційному та фільтраційному (під дією перепаду тиску) водовідділенню. Однак, необхідно вибирати такі дрібнодисперсні порошки, густина яких менша за густину базового тампонажного матеріалу. При цьому досягається додаткове пониження густини тампонажного розчину.

З числа таких полегшуючих домішок найчастіше застосовують глини, дрібнодисперсні кремнеземисті матеріали природного (осадові породи – опоку, трепел, діатоміт) та штучного (силікагель) походження, рідше застосовують крейду.

Гельцементними називають розчини, які вміщують домішки висококолоїдних, в основному монтморилонітових (бентонітових) глин. Густина таких глин  $2300\div 2600 \text{ кг/м}^3$  і їх вводять до 25% від маси твердої фази суспензії. Тому пониження густини додаванням компонента дещо меншої густини незначне і досягається, в основному, за рахунок значного збільшення водовмісту гелцементного розчину в порівнянні зі звичайним. Домішка до тампонажного цементу  $5\div 6\%$  високоякісного бентоніту дозволяє приготувати седиментаційно стійкі розчини з водоцементним відношенням  $0,7\div 0,75$  густиною  $1600\div 1700 \text{ кг/м}^3$ . Додавання  $20\div 25\%$  бентоніту дає змогу підвищити водоцементне відношення до  $1,3\div 1,5$  і понизити густину розчину до  $1300\div 1400 \text{ кг/м}^3$ .

Седиментаційна стійкість надто розведених гелцементних розчинів обумовлена високою дисперсністю частинок монтморилоніту у воді (питома поверхня  $8\cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), особливими властивостями їх поверхні і формою (висока анізодіаметричність), що в сукупності забезпечує якісну структуроутворюючу здатність. Добре диспергований бентоніт утворює в цементному розчині самостійну коагуляційну структуру, в якій розташовані частинки цементу. В подальшому така структура руйнується в результаті коагуляційної дії іонів кальцію і змінюється на структуру твердіючого тампонажного каменя.

При водовмісті гелцементних розчинів  $0,4\div 0,5$ , що забезпечує його необхідну консис-

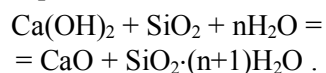
тенцію, яка за величиною така ж, як у звичайних портландцементних, початкова швидкість водовідділення в декілька разів менша. Домішка бентоніту ще більше підвищує опір фільтрації, ніж збільшує в'язкість, що можна пояснити яскраво вираженою тиксотропією коагуляційних структур монтморилоніту.

У звичайних умовах твердіння (за невисоких температур і за відсутності агресивних середовищ) вплив домішки бентоніту, якщо його додають не більше 8 %, на міцність та проникність тампонажного каменю незначний. Ці показники залишаються приблизно такими ж, як у тампонажного розчину без домішок за таких же значень водовмісту. Міцність тампонажного каменю знижується, а водопроникність незначно зростає в порівнянні зі змінами, які можливі за рахунок підвищення водовмісту. Спосіб додавання бентоніту суттєво не впливає на міцність та водопроникність тампонажного каменю.

Вадою гелцементних розчинів пониженої густини є низька температурна та корозійна стійкість тампонажного каменю. Різка зниження міцності за підвищеної температури твердіння розпочинається раніше і відбувається швидше, ніж у розчинів зі звичайного цементу. Значно швидше цементний камінь з гелцементу руйнується під дією агресивного сольового середовища, особливо за присутності іонів  $Mg^{2+}$ .

Тампонажні розчини з кремнеземистими полегшуючими домішками потребують значної кількості води. Діатоміти за походженням – осадові породи, які складаються в основному з панцирів мікроскопічних діатомітових водоростей. В 1 см<sup>3</sup> діатоміту може вміщуватися до 30 млн. панцирів (кисатиський діатоміт). Внаслідок цього діатомітовий порошок має велику питому поверхню, що дає можливість введення в діатоміто-цементний розчин більшої кількості води без втрати седиментаційної стійкості системи.

Перевага діатоміту у порівнянні з бентонітом полягає в тому, що діатоміт складається виключно з активного мікрокристалічного кремнезему, який зв'язує гідроксид кальцію, що виділяється при гідролізі мінералів портландцементу, з утворенням гідросилікату. Реакція приєднання з утворенням гідросилікату за низької температури протікає повільно і може бути описана виразом



При тривалих термінах твердіння такий камінь має більшу міцність, ніж на основі гелцементу, за рахунок утворення додаткової кількості в'язучої речовини. З підвищенням температури ця реакція значно пришвидшується, і тампонажний камінь швидко набирає міцності.

Крім діатоміту, як було вказано вище, як полегшуючі домішки використовують також інші кремнеземисті породи осадового походження – трепел і опоку, а також промислові відходи у вигляді дрібнодисперсного кремне-

зему (силікагель). У загальному випадку потреба кремнеземистих полегшуючих домішок нижча, ніж у високоякісних бентонітів, і для отримання розчинів однакової густини необхідно вводити значно більшу кількість цих домішок, ніж бентоніту, але це забезпечує більшу міцність.

Оптимальний вміст діатоміту (що виражено через відношення маси добавки до маси цементу)  $a_0=0,7 \div 0,8$  забезпечує седиментаційну стійкість при водоцементному відношенні  $1,2 \div 1,4$  і густину розчину  $1300 \div 1400$  кг/м<sup>3</sup>. Для отримання густини розчину менше  $1300$  кг/м<sup>3</sup> необхідно додавати значно більший об'єм діатоміту, ніж може зв'язуватись в гідросилікати під час реакції з продуктами гідратації цементу. Це означає, що велика частина діатоміту залишається незв'язаною, а при цьому погіршуються властивості тампонажного каменю. Для отримання розчину густиною не більше  $1500$  кг/м<sup>3</sup> достатньо додати невелику кількість діатоміту. Крім того, додавання діатоміту до розчину понад мінімально необхідну кількість призводить до погіршення прокачуваності і зменшення терміну загушення. Вміст опоки у суміші повинен бути у межах 40-50%, що забезпечує густину розчину  $1500-1600$  кг/м<sup>3</sup>.

Кремнезем, якого не вистачає, можна додати до розчину у кристалічній формі, наприклад у вигляді розмеленого кварцового піску. В такому разі можна забезпечити поєднання всіх необхідних властивостей – седиментаційну стійкість, достатній термін загушення, порівняно високу міцність та довговічність каменю. Такі рецептури розчинів доцільно застосовувати за температури у свердловині до  $100^\circ C$ .

Якщо розмелювати в'язучий матеріал до високої дисперсності то, наприклад, з ПЦТ густиною  $3200$  кг/м<sup>3</sup> можна було б приготувати полегшений тампонажний розчин густиною  $1500$  кг/м<sup>3</sup> при дисперсності цементу  $600$  м<sup>2</sup>/кг. Однак витрати на виготовлення такого ПЦТ не завжди окупуються. Крім того, тампонажний камінь з такого цементу не відповідає вимогам з міцності, термостійкості, проникності і корозійної стійкості.

Фізико-механічні властивості полегшуючих домішок впливають не тільки на тампонуєчу здатність полегшених розчинів, але й на процеси приготування суспензій та їх руху у кільцевому просторі свердловини. Виходячи з цього до розчинів ставляться такі вимоги, а саме, вони:

- повинні мати якнайменшу густину;
- не повинні вміщувати домішок, які негативно впливають на властивості в'язучого матеріалу та рідину змішування;
- повинні мати відповідну до поставленої мети дисперсність;
- частинки полегшуючих домішок повинні мати достатню міцність;
- повинні володіти стабільними фізичними властивостями (густина, дисперсність, питома поверхня) та мінімальною вологістю при тривалому зберіганні;

- не спричиняти негативного впливу на персонал та довкілля;

- мати мінімальну вартість і не бути дефіцитними.

Тип полегшуючої домішки вибирають у залежності від:

- глибини свердловини;

- вибієної температури;

- наявності пластових вод та агресивного середовища;

- завдання, яке необхідно вирішити у процесі тампонування та інших умов.

Наприклад, при цементуванні свердловини, у розрізі яких наявні тріщинуваті поглинаючі пласти, в якості полегшуючих домішок доцільно використовувати грубозернисті і волокнисті матеріали (гільсоніт, спінений перліт, обпалений діатомітовий пісок, суміш азбесту і діатоміту). Тому, якщо метою застосування полегшених тампонажних сумішей є запобігання їх поглинанню (а не лише економія на вартості матеріалів), то з використанням зазначених вище матеріалів відпадає потреба надмірного зменшення густини суспензії. Це надзвичайно важливий фактор з точки зору збереження необхідних властивостей тампонажного каменю.

У іншому разі, за великої висоти стовпа тампонажного розчину (якщо у процесі тампонування можливий гідророзрив пласта) в якості полегшуючих домішок доцільно використовувати бентонітовий та інші глинопорошки, опоку та інші дрібнодисперсні матеріали з великою водопогребією. В даному разі вирішується завдання зменшення протитиску на небезпечні пласти. Крім цього, використання таких домішок доцільне з економічної точки зору – для протискування такого розчину у кільцевий простір необхідна менша гідравлічна потужність і менший робочий тиск цементувальних агрегатів.

При великих обсягах тампонажних робіт (якщо дозволяють умови) можна зекономити значні кошти шляхом введення до суспензій значної кількості дешевшого наповнювача та води. При розкритті пластів на великих глибинах і за наявності агресивних середовищ доцільно використовувати спінений перліт, діатоміт та діатомітовий пісок. За надто високих температур (> 100°C) використовуються термостійкі в'язучі матеріали (шлаки, перлітовий шлам, вапняно-кремнеземисті суміші) та кремнеземисті полегшуючі домішки.

Для отримання максимальної міцності і мінімальної проникності тампонажного каменю в процесі приготування розчину з високим водовмістом необхідно дотримуватись таких рекомендацій:

- всі речовини, які входять до складу цементу, повинні бути активними у синтезі структури каменю (інертних речовин у складі в'язучого не повинно бути);

- вихідні компоненти цементу повинні мати найменшу густину, щоб понизити водовміст з одночасним збереженням необхідної густини суспензії;

- цемент повинен бути швидкозастійним, щоб величина ступеню гідратації в якнайкоротший термін досягнула одиниці;

- необхідно вибирати таку в'язучу речовину, в якій тверда фаза в моноліті найміцніша, відносно збільшення об'єму твердої фази в результаті гідратації максимальне, а ізотропність матеріалу найбільша.

Отже, для приготування розчинів необхідно використовувати в'язучі речовини, які дають найбільшу міцність зв'язків структури та максимальний вихід в'язучого матеріалу з одиниці об'єму вихідної суміші. Для забезпечення мінімальної водопроникності бажано, щоб питома поверхня твердої фази вихідного цементу та його новоутворень були якнайбільшими.

За стандартом АНІ [3] для полегшення можуть використовуватись всі цементи, але найчастіше рекомендуються цементи класів: А, С, Е. Як полегшуючі домішки найчастіше використовуються: бентоніт, діатоміт, гільсоніт, пуцолан, перліт. Крім того, відомі добавки під торговими марками: Еконоліт, Сфереліт Лайт-поз, Колайт, Позмент, Позмікс, Термосет та ін.

Для приготування гелцементних розчинів використовується бентонітовий порошок, кількістю 2-16%. Модифікований цемент класу А може вміщувати 5-25% бентоніту та 0,5-1,5% лігносульфонату кальцію (повільніше тужавіння та понижена водовіддача). Деякі рецептури передбачають використання портландцементу, бентоніту і солі. Сіль зменшує потребу у воді, тому тампонажний камінь має підвищену міцність. За високих температур додають лігносульфонат кальцію.

Компанією «Укр СКС» розроблено ряд рецептур полегшених тампонажних матеріалів, серед яких найчастіше використовується суміш ОТМ-5, в складі якої присутня мінеральна силікатна домішка. При розробці рецептури цієї системи та її серійному виробництві враховувались значення параметрів, що регламентуються нормативними документами [4], і такі, що не регламентуються, але є важливими для формування тампонажного каменю. Серед усіх регламентованих параметрів, які характеризують властивості полегшених тампонажних розчинів та властивості тампонажного каменю, найважливішими є показник седиментаційної стійкості розчину (оцінюється показником водовідділення, який не повинен перевищувати 7 мл.), та показник міцності каменю (міцність на вигин через 48 годин твердіння не менше 0,7 МПа для низьких і нормальних температур і не менше 1,0 МПа для помірних і підвищених температур). Однак, багаторічний досвід розробки та використання полегшених тампонажних систем дає підстави зробити висновок, що зазначені вище вимоги є заниженими. Вони обґрунтовані реальними показниками розроблених рецептур і не враховують характеристик гірничо-геологічних умов та особливостей формування тампонажного каменю у конкретних свердловинах, що у подальшому відображається на параметрах їх експлуатації. Виходячи з

Таблиця 1 – Показники властивостей полегшених тампонажних матеріалів

Найменування показника	Гельцемент	ОТМ-5
Водоцементне відношення	1,05	0,95
Густина тампонажного розчину, кг/м <sup>3</sup>	1500	1500
Розтічність, мм	250	250
Водовідділення, мл	12	1,5-3
Межа міцності на вигин за температури формування тампонажного каменю		
- через 48 годин, МПа, T=75°C	1,23	2,96 - 3,8
- через 48 годин, МПа, T=50°C	2,54	3,24 - 4,4
- через 48 годин, МПа, T=40°C	1,97	2,6
- через 48 годин, МПа, T=22°C	показник відсутній	1,5
- через 36 годин, МПа, T=40°C	1,45	2,44
- через 36 годин, МПа, T=22°C	1,1	1,21
- через 24 годин, МПа, T=40°C	1,25	1,3
- через 24 годин, МПа, T=22°C	показник відсутній	0,706

цього, при розробці рецептури полегшених тампонажних матеріалів поставлено завдання досягнення найкращих показників водовідділення та міцності, причому це завдання ускладнюється з зменшенням густини розчину. Для оцінки основних властивостей полегшених систем, готували тампонажні розчини за розробленою рецептурою з ОТМ-5 та гелцементної суміші і проводили лабораторні випробування у відповідності з вимогами [5]. Результати лабораторних випробувань подані у таблиці 1.

Аналіз лабораторних випробувань свідчить, що за однакової густини тампонажного розчину, кількість води для приготування розчину з ОТМ-5 в порівнянні з гелцементом менша, унаслідок чого значення водовідділення у два рази нижче за нормативний показник. Міцність тампонажного каменю суттєво залежить від температури. Для каменю з гелцементного розчину за низьких температур міцність відсутня взагалі. З її підвищенням міцність зростає, але при максимальній температурі випробування – спадає. Тампонажний камінь з ОТМ-5 у порівнянні з гелцементом має більший показник міцності на вигин за рівних умов, який навіть за найнижчої температури перевищує нормативне значення. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що за нормативними показниками використання тампонажного матеріалу ОТМ-5 для приготування полегшених розчинів є доцільнішим.

Аналіз промислового матеріалу за результатами виконання тампонажних робіт, а також теоретичні і експериментальні дослідження свідчать про те, що ряд властивостей полегшених тампонажних систем, які не регламентуються вимогами нормативних документів, суттєво впливають на якість розмежування пластів. До таких властивостей належать: ступінь структурованості тампонажного розчину, проникність тампонажного каменю та його корозійна стійкість.

Ступінь структурованості тампонажного розчину можна охарактеризувати двома відно-

сно залежними параметрами. Перший з них – ступінь та швидкість утворення структури розчину після припинення його руху (зависання розчину). Цей показник можна достатньо умовно оцінити статичним напруженням зсуву (СНЗ), яке не є постійною величиною. Граничне значення СНЗ характеризується пластичною міцністю тампонажного розчину, що має коагуляційну структуру, яка переходить у коагуляційно-кристалічну. Від величини статичного напруження зсуву полегшеного розчину залежить ефективність передачі тиску на розташовану нижче порцію тампонажного розчину у момент різкого зниження гідростатичного тиску на пласти за рахунок утворення просторової структури, унаслідок чого можливе формування неякісного кріплення свердловини.

Другий важливий параметр – ступінь структурованості тампонажного розчину, який умовно характеризується динамічним напруженням зсуву (ДНЗ) і теж змінюється у часі. Від цього показника залежить ступінь заміщення бурового розчину на тампонажний у кільцевому просторі свердловини. Залежність ступеня заміщення розчинів від ДНЗ та фізичний зміст цього явища полягає у тому, що чим структурованіший розчин (а значить схильніший до збереження своєї форми), тим складніше його витіснити з об'ємів складної геометричної форми, і тим гірше він сам заповнює такі об'єми. При розробці відомих рецептур полегшених тампонажних розчинів проблема їх стабільності вирішується використанням складних колоїдних систем або полімерних реагентів, що неминуче призводить до збільшення ступеня структурованості. Крім того, такі домішки призводять до зниження міцності тампонажного каменю. На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що обидва зазначені параметри (СНЗ, ДНЗ) повинні підтримуватись у мінімальних межах. Оскільки полегшені тампонажні розчини готують з підвищеним показником водоцементного відношення (у більшості випадків більше 0,6), то відповідно у камені,

Таблиця 2 – Склад модельної пластової води

Назва іонів	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Вміст, мг/л	9585	1464,2	240,5	91,2	6315,5	480

Таблиця 3 – Міцність зразків тампонажного каменю з ОТМ-5 та гелцементу

Час твердіння, дб	Межа міцності на вигин, МПа			
	ОТМ-5		Гельцемент	
	прісна вода	пластова вода	прісна вода	пластова вода
2	1,5	-	1,33	-
5	2,25	2,28	1,9	2,1
28	2,63	3,23	1,95	2,5
60	2,83	2,95	1,98	2,13
90	2,88	2,92	2,03	2,15
120	3,35	3,4	2,43	2,45
150	3	2,85	2,15	2
180	3,13	2,75	2,05	1,9
210	2,75	3,5	1,88	1,88
240	3,13	3,5	2,1	2,25
270	2,85	3,05	2,7	3,1
300	3,13	3,15	2,48	2,25
330	2,95	3,25	2,38	2,38
360	3,2	3,33	1,48	2,3

який утворився з такого розчину, збільшений об'єм пористого простору, що, в свою чергу, збільшує проникність каменю. Домішка до полегшених розчинів висококолоїдних систем та полімерних реагентів дозволяє дещо знизити проникність каменів, але їх використання для цього небажане через зазначені вище причини. У рецептурі ОТМ-5 використана домішка має високу дисперсність і дозволяє стабілізувати розчини до мінімальних показників водовідділення (таблиця 1) без збільшення ступеня структурованості розчину, зменшити проникність тампонажного каменю та підвищити його міцність.

Велика кількість інертних домішок у рецептурах полегшених тампонажних розчинів зменшує концентрацію в'язучого, унаслідок чого багато частинок не бере участі у синтезі структури каменю. Такий тампонажний камінь, особливо якщо у ньому наявні колоїдні частинки, має високу корозійну уразливість.

Оцінка корозійної стійкості тампонажних каменів з ОТМ-5 та гелцементу проводилась за показником зниження міцності зразків, які тверділи у змодельованому агресивному середовищі, у порівнянні з міцністю зразків, які тверділи у водопровідній воді. Склад модельної пластової води поданий в таблиці 2.

Для проведення досліджень виготовлялись зразки-балочки розміром 20×20×80 мм з тампонажних розчинів за параметрами таблиці 1, які витримувались протягом двох дб у прісній воді за температури 45°C. Це обумовлено вимогами нормативних документів на проведення випробувань тампонажних цементів. Після цього контрольні зразки поміщались у прісну воду, а

дослідні – у модельну пластову, де зберігались за температури 45°C.

Кожен місяць протягом року проводилось визначення міцності зразків на вигин, результати яких подані у таблиці 3.

Аналізуючи отримані дані, видно, що початкова і кінцева міцність зразків ОТМ-5 вища, ніж зразків із гелцементу. Частково це пояснюється тим, що на основі ОТМ-5 готувався тампонажний розчин густиною 1500 кг/м<sup>3</sup> з меншим водоцементним відношенням, ніж на основі гелцементу. Але більший вплив на цей показник має використання різних стабілізуючих домішок у порівнюваних матеріалах. В ОТМ-5 мінеральна силікатна домішка вступає у взаємодію з гідроксидом кальцію, який утворюється при гідратації портландцементної складової тампонажної суміші. Ця домішка дозволяє отримати додаткову кількість тоберморитоподібних гідросилікатів кальцію, що позитивно впливає на міцнісні характеристики цементного каменю, зменшує кількість вільного гідроксиду кальцію в системі унаслідок чого зменшується імовірність реакції вилужнювання. У гелцементних розчинах, як стабілізуюча домішка використовується бентонітовий порошок, який складається в основному з мінералів монтморилонітової групи. Ці мінерали негативно впливають на корозійну стійкість та міцність тампонажного каменю, унаслідок чого підвищуються його об'ємні деформації (збільшується усадка), утворюються тріщини та канали негерметичності. Ці явища пояснюються рухливістю кристалічної ґратки монтморилоніту, його високою гідрофільністю, емністю по-

глинання та хімічною активністю колоїдної частини.

Крім того, за даними досліджень видно, що міцність тампонажного каменю при дії на нього модельної пластової води дещо вища, ніж прісної води. Гіпотеза дії пластових вод на тампонажний камінь полягає у тому, що вони проникають у тампонажний камінь з початком його утворення, коли він має ще достатню проникність. Перший результат дії пластових вод полягає у різкому зниженні проникності тампонажного каменю, що є результатом закупорювання його пор і капілярів продуктами хімічної взаємодії складових каменю з солями (перш за все, магнею) пластових вод. Гідрооксид магнею, який утворився в результаті обмінної реакції з гідрооксидом кальцію, колюматує поровий простір тампонажного каменю. Прісна вода, проникаючи глибоко у пори каменю, призводить до виникнення реакції вилужнювання оксиду кальцію (CaO) та утворення і руйнування гідросульфоалюмінату кальцію, а після цього відбувається кристалізація або розчинення гіпсу. Такі хімічні процеси призводять до руйнування тампонажного каменю. Для оцінки впливу інших видів корозійних середовищ на міцність і корозійну стійкість тампонажного каменю з ОТМ-5 заплановано проводити подальші дослідження, але вже зараз можна зробити висновок, що цей матеріал володіє необхідними властивостями і його доцільно використовувати для тампонування нафтових і газових свердловин.

### Література

- 1 Данюшевский В.С. Справочное руководство по тампонажным материалам (2-е издание) / В.С. Данюшевский, Р.М. Алиев, И. Ф. Толстых. – М.: Недра, 1987. – 373 с.
- 2 Булатов А.И. Тампонажные материалы: Учебное пособие для вузов / А.И. Булатов, В.С. Данюшевский. – М.: Недра, 1987. – 280 с.
- 3 API Specification 10 A. 22-е видання. Технічні умови на цементі і матеріали для цементування свердловин. І. 1995.
- 4 Цементи тампонажні. Технічні умови. ДСТУ Б.В.2.7. – 88 – 99. [чинний від 2000-01.01]. – К.: Держстандарт України, 1999.
- 5 Цементи тампонажні. Методи випробувань. ДСТУ Б.В.2.7. – 86 – 99. [чинний від 2000-01.01]. – К.: Держстандарт України, 1999.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*  
28.01.14

*Рекомендована до друку*  
*професором Коцкуличем Я.С.*  
*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*  
*канд. техн. наук Цьомко В.В.*  
*(НДПІ ВАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)*