

Cementy wiertnicze.

Część 7. Cementy stosowane do odwiertów o małych średnicach

Oilwell cements.

Part 7. Cements for slimhole wells

1. Wprowadzenie

Cementowanie odwiertów o małych średnicach jest trudne, lecz ma obecnie duże znaczenie. Cementy stosowane do wytwarzania strefowej izolacji w otworach wiertniczych o małych średnicach obejmują dobrej jakości cementy wiertnicze ISO klasy G lub klasy H, cementy żużłowe lub pucolanowe, a także polimerowe, które wszystkie składają się z małych cząstek. Domieszki takie jak wpływające na ciekłość i opóźniacze, muszą być stosowane w małych ilościach. Wiercenie i cementowanie odwiertów o małych średnicach jest nie tylko znacznie tańsze niż wiercenie i cementowanie konwencjonalnych odwiertów, lecz także znacznie korzystniejsze dla środowiska.

Dwie ogólnie przyjęte definicje stosowane do określania odwiertów o małych średnicach, które są także czasem nazywane mikro-odwiertami, są następujące (1, 2):

- odwiert, w którym 90% długości miało średnicę mniejszą od 18 cm (7 cali),
- odwiert, w którym 70% długości miało średnicę mniejszą od 13 cm (5 cali).

Przyczyny wykonywania odwiertów o małych średnicach są następujące (2):

- wykonywanie odwiertów o średnicy mniejszej od odwiertów konwencjonalnych stosowanych na tym złożu jest spowodowane tym, że zmniejszona średnica ułatwia skrócenie czasu i zmniejszenie kosztów eksploatacji wiertnicy oraz orurowania,
- jest możliwość uzysku całego rdzenia z otworu w trakcie operacji wiercenia,
- wykonywanie odwiertów o małych średnicach w przypadku trudno dostępnych lokalizacji ze względów logistycznych i powtórne podjęcie eksploatacji, gdy istniejące odwierty mają małe średnice.

Odwierty o małych średnicach zostały wprowadzone w latach siedemdziesiątych w Afryce Południowej przy wydobywaniu złota,

1. Introduction

The cementing of slimhole wells is difficult, but important nowadays. Cements utilised for giving zonal isolation in slimhole wells include good quality ISO Class G or Class H oilwell cements, slag or pozzolanic cements, or ionomer cements, which all have low particle sizes. Additives, such as fluid loss controllers and retarders, need to be present in small quantities. Slimhole well drilling and cementing activities are not only much cheaper than conventional well drilling and cementing ones, but are also much more environmentally friendly.

The two commonly accepted definitions of a slimhole well, which is sometimes also referred to as either a micro-well or a small hole-well, are as follows (1, 2):

- A well in which 90% is drilled with a diameter of less than 18 cm (7 inches)
- A well in which 70% is drilled with a diameter of less than 13 cm (5 inches).

The objectives for slimhole drilling are given thus (2):

- The drilling of a well whose diameter is smaller than the diameter used on conventional wells in the area – the reduced diameter helps to cut the time and cost of rig-time plus the cost of the tubulars.
- The ability to retrieve cores from the entire well during the drilling operation.
- Slimhole drilling is becoming increasingly favoured in remote locations for logistical reasons and re-entry operations where existing wells have small diameters.

Slimhole wells were originally developed in the 1970s for use in the South African gold industry for beneficiating the processing of gold ore, but the wells had not been cemented. During the late 1980s interest was being shown in utilising slimhole wells in the oil and gas industry for economic and/or environmental reasons regarding exploration and production. In 1990 BP Exploration drew up a drilling and completions programme for constructing

w celu zaoszczędzenia rudy złotoonośnej, jednak nie stosowano cementowania tych odwiertów. Z końcem lat osiemdziesiątych powstało zainteresowanie stosowaniem odwiertów o małych średnicach w przemyśle wydobywczym ropy i gazu ze względów ekonomicznych oraz środowiskowych, związanych z poszukiwaniami i produkcją. W roku 1980 Dział Poszukiwań BP wprowadził program wierceń obejmujący cztery odwierty o małych średnicach przy poszukiwaniu ropy i gazu w Republice Kongo. Odwierty o małych średnicach zostały wybrane z szeregu następujących przyczyn:

- trudno dostępny teren w obszarze wierceń i cementowania tych odwiertów,
- mniejszy zakres prac niż w przypadku wykonywania tradycyjnych odwiertów i ich wykańczania (w tym cementowania)
- mniej odpadów otrzymanych z płuczki wiertniczej krążącej przed cementacją odwiertu, co ułatwiać będzie późniejsze ich usuwanie,
- większa ekonomiczność przy wydobywaniu ropy lub gazu,
- mniejsze zużycie chemikaliów niż w przypadku konwencjonalnego cementowania,
- mniejsza ogólna ilość odpadów z wszystkich operacji związanych z wykonywaniem otworów o mniejszej średnicy w porównaniu z tradycyjnymi,
- zmniejszenie operacji wykonywania poszukiwawczych i eksploatacyjnych odwiertów o małych średnicach, co przesądza o ich mniejszym oddziaływaniu na środowisko w porównaniu z tradycyjnymi.

Te odwierty o małych średnicach były pionowe i zostały bez problemów zacementowane, co pozwoliło na otrzymanie dobrej izolacji strefowej odwiertów, złożonej z warstwy stwardniałego cementu w przestrzeni pierścieniowej, w odpowiednim czasie.

Natomiast od roku 1993 wykonano szereg odwiertów o małych średnicach, na większą głębokość i poziomych, ze względów logistycznych i środowiskowych (3). W związku z tym powstały problemy z ich cementowaniem.

Są dwie główne przyczyny, z powodu których proces cementowania odwiertów o małych średnicach różni się od tego w konwencjonalnych odwiertach:

- Występowanie dużych, równoważnych gęstości dynamicznych „ECD” (z ang.) zawieszin co jest spowodowane wąskimi przestrzeniami pierścieniowymi, w których tęższe (wiąże) i twardnieje wprowadzony cement, co może przekraczać gradient pęknięcia występujący w danym odwiercie. Na ECD duży wpływ ma także wypłukany lub wąski odcinek otworu w odwiercie o małej średnicy, który może szkodliwie oddziaływać na tężenie i twardnienie cementu.
- Strefowa izolacja jest trudna do osiągnięcia wskutek złego wycentrowania orurowania w postaci rur okładzinowych/kolumn traconych w dolnej części otworu i bardzo małym wyporze i szybkości przepływu, co może niekorzystnie wpływać na otrzymanie dobrego uszczelnienia cementem wokół przestrzeni pierścieniowej, w odwiercie o małej średnicy.

four slimhole wells in connection with exploration for oil and/or gas in the Congo Republic. Slimhole wells were chosen for this well construction for numerous reasons:

- Remote terrain of the area for drilling and cementing these wells.
- Smaller size of the operations than for traditional well drilling and completions (including cementing).
- Less cuttings obtained from the drilling muds circulated prior to the actual well cementing, which would facilitate disposal afterwards.
- More economical for extracting oil and/or natural gas.
- Less chemicals being employed than in conventional well cementing.
- Less overall waste disposal from the entire slimhole operations than from conventional operations.
- The miniaturisation of the slimhole well exploration and production process being more environmentally friendly than conventional exploration and production activities.

These particular slimhole wells were vertical wells and were all successfully cemented, so good zonal isolation of the wells by the hardened cement sheaths in the annuli was achieved at the time. However, by 1993 a number of extended reach and horizontal slimhole wells had been drilled for logistical and environmental considerations (3). This created problems for well cementing, as indicated below.

There are two main reasons as to why slimhole wells are different from conventional wells, which influence the nature of the well cementing process:

- High equivalent circulating densities (ECDs) are found, due to the very narrow annuli into which the thickening (setting) and hardening well cements are placed, which may exceed the fracture gradients pertaining to the wells in question. ECD is very sensitive to hole geometry. The magnitude of the contribution to ECD in slimholes is normally considerable. ECD is very sensitive to washed-out or tight-hole sections in a real slimhole well, which can be detrimental to cement thickening and hardening.
- Zonal isolation can be difficult to achieve, due to poor centralisation downhole of the casings/liners in the annuli and very low displacement flow rates, which might adversely affect obtaining good cement seals around the annuli in the slimhole wells.

2. Preconditioning for the Well Cementing Job

As ECD is very sensitive to hole diameter for a particular slimhole geometry, the magnitude of the frictional composition to ECD in slimholes is expected to be considerable. So, for slimhole drilling, it is better to develop a computer model based upon fluid mechanics, in order to optimise slimhole drilling hydraulics by taking into account drilling mud rheology, drill-string rotation and eccentric positioning of the drill-string. Because of the complex nature of ECDs

2. Wstępne warunki procesu cementowania odwiertów

Ponieważ na ECD bardzo duży wpływ ma średnica otworu w poszczególnej geometrii odwiertów o małych średnicach, przypuszcza się, że udział tarcia w ECD jest znaczny. Z tego względu w przypadku wiercenia otworów o małych średnicach, lepiej jest opracować model komputerowy oparty na mechanice płynów w celu optymalizacji hydrauliki tego procesu przy uwzględnieniu reologii płuczki wiertniczej, obrotów przewodu wiertniczego i ekscentrycznego jego ustawienia. W związku ze złożonym charakterem ECD w odwiertach o małej średnicy, spowodowanym bardzo małą przestrzenią pierścieniową względem ścian odwiertu i rur „traconych” oraz orurowania, w praktyce jest często trudno opracować odpowiednie programy modelowania komputerowego.

Skuteczne przemieszczanie płuczki jest ważne i z tego względu stosuje się tylko zawiesiny o małej lepkości do przepłukania zewnętrznego pierścienia z pozostałości po płuczce wiertniczej przed cementowaniem odwiertów o małych średnicach, w celu wyeliminowania możliwości zanieczyszczenia zaczynu cementowego resztkami płuczki wiertniczej. Warunkiem wstępnym w odwiertach o małych średnicach jest krążenie płuczki wiertniczej. Jednak jeżeli płuczka nie może krążyć, wówczas nie ma możliwości prawidłowego umieszczenia orurowania w otworze o małej średnicy, w związku z nagłym wzrostem ciśnienia (4), które zwykle uniemożliwia prawidłową cementację odwiertu.

Wymagania dotyczące wyposażenia w sprzęt służący także do cementacji odwiertów o małej średnicy zebrano w tablicy 1.

Tablica 1. Wymagania dotyczące wyposażenia odwiertu zależnego od objętości otworu i wybranej wiertnicy

- Mieszarki porcjowe powinny być stosowane do prac wymagających mniej niż 100 baryłek zaczynu cementowego.
- Ciężkie rury okładzinowe, szczególnie łączniki z zaworem zwrotnym i buty rur okładzinowych, klocki i elementy do centrowania muszą być dobrane z wyprzedzeniem aby sprawdzić prawidłowość ich wyboru.
- Zbiorniki do przechowywania cementu powinny mieć odpowiednią pojemność.
- Odcinki powierzchniowe wymagają więcej cementu.
- Cement luzem może nie być odpowiedni w przypadku mniejszego zakresu prac, należy wówczas stosować cement workowany i przechowywać w suchym miejscu przed użyciem.
- Mieszanie i pompowanie powinny zostać wybrane z wyprzedzeniem w stosunku do planowanych prac.
- Należy zatrudniać tylko doświadczonych specjalistów do cementowania odwiertów o małych średnicach, ponieważ wymagana jest większa staranność w celu udanego prowadzenia tych prac w porównaniu z konwencjonalnymi.

in slimhole wells, on account of the very narrow annuli between the borehole walls and the casing orliner, in practice it is often difficult to develop very accurate computer modelling scenarios.

Efficient mud displacement is essential, so only low viscosity flushes should be used as spacers for flushing out any residual drilling mud in the annulus, prior to the slimhole well cementing, so as to avoid contamination of the cement slurry by any drilling mud that has been left behind. In a slimhole well there is a prerequisite need to circulate drilling mud. However, if the mud cannot be circulated, then it might not be possible to place the casing/liner in the slimhole effectively, owing to the surge pressure experienced (4) that usually prevents the well from being cemented effectively.

Batch-mixing equipment requirements for cementing slimhole wells are set out in Table 1.

Table 1. Equipment Requirements (influenced by hole volumes and rig selection)

- Batch mixers should be used for jobs needing less than 100 barrels of cement slurry.
- Casing hardware, especially float collars and shoes, plugs and centralisers, must be sorted out in advance to see if they fit.
- Cement storage tanks should be of an appropriate size.
- Surface sections require more cement.
- Bulk cement may be inappropriate for smaller size jobs, so cement sacks should be used here and stored dry prior to usage.
- Mixing and pumping must be checked out in advance of the actual job.
- Only experienced cementers should be employed for slimhole well cementing jobs since greater care is required for achieving a successful slimhole cementing job than for conventional well cementing jobs.

3. Extended Reach and Horizontal Wells

Extended reach and horizontal wells have been drilled since ca. 1992. Horizontal wells in reality are not always at 90° to the vertical, but the name is normally used when extended reach wells attain around 80° to the vertical. Drilling programmes for slimhole wells have been commonly and successfully used in the Middle East and have involved both new and re-entry wells with long horizontal drilling programmes to maximise oil and gas output. Coiled tubing drilling has been favoured by the US Department of Energy since 1999 (5). Multilateral slimhole wells have also been drilled, but there is to date a dearth of useful information being available about well cementing here.

Coiled tubing is more environmentally friendly and does not involve individual sections of drillpipe. Instead a continuous length of tubing is fed off a real well and sent down the hole. The coiled tubing has a smaller diameter than conventional drillpipe, so a smaller volume of cuttings is generated. In addition to reducing these waste volumes, the surface footprint is smaller, the noise level is lower and air emissions are reduced. The logging information obtained from

3. Odwierty dalekiego zasięgu i poziome

Odwierty dalekiego zasięgu i poziome rozpoczęto wykonywać około roku 1992. Poziome odwierty w rzeczywistości nie są położone pod kątem 90° do pionu, jednak ten termin stosuje się zwykle w przypadku gdy odwierty są położone pod kątem około 80°. Wiercenia otworów o małych średnicach były stosowane powszechnie i z sukcesem na Środkowym Wschodzie i obejmowały nowe jak i powtórnie podjęte odwierty wykonywane poziomo w celu zwiększenia wydobycia ropy lub gazu. Wiercenie z użyciem przewodu nawijanego było preferowane przez Amerykański Departament Energii od 1999 roku (5). Odwierty rozgałęzione o małych średnicach także wykonywano, jednak do dzisiaj brak użytecznych informacji na temat ich cementowania.

Wiercenie z użyciem przewodów nawijanych jest bardziej przyjazne dla środowiska i nie wymaga stosowania poszczególnych odcinków rur do wierceń. W ich miejsce rury o niezbędnej długości są wprowadzane do odwiertu i zagłębiane w otworze. Przewody nawijane mają mniejszą średnicę niż konwencjonalne rury do wierceń z czym wiąże się mniejsza objętość do odcinania. Dodatkowo w celu zmniejszenia tej traconej objętości, powierzchnia odcisku jest mniejsza, poziom hałasu jest niższy, a także emisja powietrza. Informacje do zalogowania uzyskane z otworu o małej średnicy mogą być szybko wykorzystane do wykonywania głębszych (duży kąt) i poziomych odwiertów z już istniejących.

Do cementów stosowanych w przypadku cementowania odwiertów dalekiego zasięgu lub poziomych o małych średnicach odnoszą się podobne wymagania jak do używanych w pionowych odwiertach o małych średnicach. Jednak te odwierty stwarzają większe problemy i jest wiele metod odnoszących się szczególnie do głębszych lub poziomych otworów, które należy także wziąć pod uwagę (6). Oznacza to, że nie może występować wydzielanie mleczka lub segregacja zaczynów cementowych. Trzeba więc zapewnić bardzo dobrą kontrolę spadku płynności, najlepiej poniżej 30 ml w ciągu 30 minut, według ISO. Mniejsza wytrzymałość statyczna żelu ma także duże znaczenie. Nie powinien występować skurcz oraz wymagania odnośnie do ECD powinny być dotrzymane. Jeżeli nie można zapewnić krążenia płuczki wiertniczej przed procesem cementowania, wówczas konwencjonalne cementowanie jest niewskazane. Gdy wiercenie otworów o małych średnicach następuje wewnątrz istniejących odwiertów takich jak poziome i rozgałęzione (patrz punkt 4), wówczas osłony cementowe w istniejących odwiertach stanowią w najgorszym razie izolację strefową tych nowych odwiertów o małych średnicach, które są wykonywane i wyposażane.

4. Odwierty rozgałęzione o małych średnicach

Rozgałęzione odwierty można zdefiniować jako dwa lub więcej otworów (odgałęzień) wierconych z pierwotnego odwiertu (trzon). I trzon i odgałęzienia mogą być poziome, odchylone (o większej głębokości) lub pionowe. Rozgałęzione odwierty nie tylko pozwalają na zachowanie jednego, pierwotnego otworu, co już stanowi

slimholes can be readily utilised for extended reach (high angle) and horizontal wellbores drilled from within existing wells.

Cements used for the cementing of extended reach and horizontal slimhole wells need to possess similar requirements to those employed with vertical slimhole wellbores, but these wells are of course more critical and consequently many of the procedures that apply specifically to extended reach and horizontal wells need to be taken into account (6). This means that there must be no bleeding or segregation within the cement slurries. So there has to be strong fluid loss control, ideally below 30 ml/30 minutes ISO. Low static gel strengths are also essential. There should be no shrinkage and the ECD requirements within the wells should be met. If drilling mud cannot be circulated before cementing takes place, then cementing is inadvisable by conventional means. When the slimholes have been drilled from within existing wells, such as horizontal wells or multilateral wells (see later), then the cement sheaths from the existing wells can often offer at least some zonal isolation to these new slimhole wells being drilled and completed.

4. Multilateral Slimhole Wells

A multilateral well can be defined as two or more drainholes (branches) drilled from a primary wellbore (trunk). Both the trunk and the branches can be horizontal, deviated (extended reach) or vertical. Multilateral wells not only permit the existence of one primary borehole, which itself has substantial environmental attractions, but also allow the extension of the lifetime of a given oil- and/or gas-field by enabling access to both thin layer and fractured oil and gas reservoirs without the need to drill new wells from the surface. Multilateral well technology has developed from and alongside horizontal well technology (7, 8).

In multilateral slimhole wells the cements and their slurry compositions require to be based upon similar principles to those discussed above for extended reach and horizontal slimhole wells. A major difference arises with multilateral junctions, where the junctions often require to be cemented with ductile cement compositions to avoid shrinkage and gas migration, such as those with fibres, latexes and/or expansive cements (9). Cementing the lateral-to-parent wellbore junction should allow the cement seal to isolate the laterals from each other and from the parent bore (7).

5. Cementing of Horizontal and Multilateral Slimhole Wells

Originally these horizontal and multilateral slimhole wells could not be cemented properly or at all, because of the impossibility in many instances of being able to displace drilling muds properly, and, of course, such displacement is a common prerequisite for undertaking successful well cementing here. However, Shell Oil in the USA developed a novel method of dealing with this particular problem (10), which is called reverse circulation cementing (RCC) and is summarised below:

korzyść dla środowiska, lecz także umożliwiają przedłużenie czasu eksploatacji ropy lub/i gazu na danym polu wydobywczym, umożliwiając dostęp także do cienkich warstw lub podzielonych zbiorników ropy i gazu, bez konieczności wiercenia nowych odwiertów z powierzchni. Technologia rozgałęzionych odwiertów rozwinęła się w oparciu o technologię poziomych odwiertów i niezależnie od niej (7, 8).

W przypadku rozgałęzionych odwiertów o małych średnicach cementy i skład ich zaczynów powinny być oparte na podobnych zasadach do przedyskutowanych wcześniej dla głębszych i poziomych odwiertów o małych średnicach. Największe różnice występują w przypadku wielopoziomowych rozgałęzień, szczególnie gdy rozgałęzienia wymagają cementacji za pomocą plastycznych zestawów cementowych, na przykład z dodatkiem włókien i lateksów lub cementów ekspansyjnych w celu wyeliminowania skurczu i migracji gazów (9). Cementowanie bocznych lub macierzystych, rozgałęzionych otworów powinny umożliwiać uszczelnienia cementem w celu odizolowania od siebie bocznych i macierzystych odwiertów (7).

5. Cementowanie poziomych i rozgałęzionych odwiertów o małych średnicach

Pierwotnie te poziome i rozgałęzione odwierty o małych średnicach nie mogły być cementowane prawidłowo, lub w ogóle, ze względu na brak możliwości w wielu przypadkach, poprawnego usunięcia płuczki wiertniczej, a jak wiadomo to usunięcie jest warunkiem podjęcia skutecznego cementowania odwiertu. Jednak w Shell Oil w USA opracowano nowatorską metodę rozwiązania tego problemu (10), która jest nazywana: „cementowanie z odwrotnym obiegiem” (RCC) i zostanie opisana poniżej.

Zaczyn cementowy wprowadza się do odwiertu zanim zostanie w nim umieszczone orurowanie lub rury tracone. Pustki w stwardniałym cemencie spowodowane słabym wycentrowaniem zostają wyeliminowane przez takie wprowadzenie cementu. Wiercenie otworów o małych średnicach powoduje dodatkowe utrudnienia związane z usuwaniem płuczek wiertniczych w związku z wąską przestrzenią pierścieniową, spowodowaną tą techniką. Płuczki i inne powiększone części otworu zostają wypełnione cementem. Odwiert w pierwszym rzędzie zostaje wypełniony zaczynem cementowym, a objętość cementu może początkowo zostać wprowadzona do odwiertu, wypełniając przestrzeń pierścieniową po umieszczeniu orurowania.

Składniki zaczynu cementowego w przypadku odwiertu o małej średnicy mogą być następujące (10):

- portlandzki cement wiertniczy (na przykład klas C, G lub H według ISO),
- cement z mielonym, granulowanym żużlem wielkopieczowym (mgżw),
- cement z dodatkiem pucolany, na przykład mielony popiół lotny, metakaolinit, pył krzemionkowy, popiół z łusek ryżowych, prażona glina i inne,

The cement slurry is placed in the wellbore prior to insertion of the casing or liner. Voids in the resultant hardened cement caused by poor centralisation are eliminated by such placement. Slimhole drilling results in additional difficulties arising in removing drilling fluids because of the narrower annulus that this technique creates. Washouts and other enlarged portions of the borehole are filled with cement. The wellbore can first of all be filled with cement slurry, or else a volume of cement can initially be placed in the wellbore that will fill the annulus after the casing is inserted.

The cementitious component of the slimhole well cement slurry can be one of the following (10):

- Conventional Portland oilwell cement (like ISO Classes C, G or H).
- Extended cement with ground granulated blastfurnace slag (ggbs).
- Extended cement with pozzolan, like pulverised fuel ash, metakaolin, microsilica, rice husk ash, partially burnt clay etc.
- Ggbs without Portland cement, suitably activated with calcium hydroxide, calcium carbonate or sodium silicate, in a drilling mud-to-cement type of conversion.
- Microfine cements based upon ordinary and sulphate-resisting Portland cements, and also extended cements (like those containing ggbs) ordinarily contain particles in the 4000-7000 cm^2/gram of sizes 5.5-16 microns.
- Ionomer cements formed by combining acid functionalised polymers with metal oxide crosslinkers. Partially hydrolysed polyacrylamide polymers with molecular weights in the range 5000 to 15 million are mixed with metal-containing components such as appropriate dead-burnt oxides like CaO, MgO, MnO or ZnO, which are usefully ductile for slimhole well cementing.

There is a need with slimhole well cementing to prevent the open hole from being exposed to excessive pressure during installation of a liner and also whilst cementing (11). A novel conveyance system allows for two modes of circulation of fluids whilst the liner is being deployed and landed in the well, with a third conventional mode for circulating and cementing operations. This militates against high surge and swabbing pressures during installation of a casing (or liner) and high circulation pressures whilst cementing. Also, the system obviates against excessive pressure in the open hole section, which might lead to lost circulation within the slimhole. Unfortunately, there is no mention of what cements and additive types have been used in the experiments conducted (11).

The type of well cementing described above is now termed 'reverse circulation cementing' (RCC), because the cementing is carried out before the casing is inserted into position to create the annulus (10,11). RCC is arousing considerable interest now within the oil and natural gas industries. This has arisen due to the increasing importance of 'green issues' in drilling and completion activities in the 21st century.

- mielony granulowany żużel wielkopiecowy bez cementu portlandzkiego, aktywowany wodorotlenkiem wapniowym, węglanem wapniowym lub krzemianem sodowym w formie płuczki wiertniczej,
- cementy o dużej miakkości wytworzone z klasycznego cementu portlandzkiego odpornego na siarczany, a także cementy z dodatkiem mineralnym (na przykład te z dodatkiem mgźw, zawierające zwykle cząstki o wymiarach 5,5 – 16 mikronów i powierzchni 400-700 m²/kg,
- cementy polimerowe wytworzone z mieszaniny polimerów z poprzecznymi wiązaniami z tlenkami metali. Częściowo zhydrolizowane polimery poliakrylamidowe o masie cząsteczkowej w zakresie 5000 do 15 milionów zmieszane ze składnikami zawierającymi metale, na przykład „martwo” wyprażone tlenki CaO, MgO, MnO lub ZnO, które są przydatne do cementowania otworów o małych średnicach.

W trakcie cementowania otworów o małych średnicach trzeba je zabezpieczyć przed nadmiernym ciśnieniem, a także w trakcie wprowadzania rur traconych (11). Nowatorska metoda polega na zastosowaniu dwóch układów krążenia cieczy w trakcie rozmieszczenia rur traconych w odwiercie, a trzeci układ zapewnia tradycyjne prowadzenie procesu cementacji. Ta metoda zabezpiecza przed nagłym znacznym wzrostem ciśnienia w trakcie instalacji orurowania (lub wprowadzanie rur traconych) lub wysokiego ciśnienia cyrkulacji w trakcie cementowania. Ta metoda eliminuje także zagrożenie wystąpienia nadmiernego ciśnienia na odcinku otwartego otworu, co może prowadzić do zatrzymania krążenia w otworze o małej średnicy. Niestety brak informacji jakie cementy i domieszki były stosowane w trakcie doświadczeń (11).

Wariant cementowania odwiertu opisany powyżej jest teraz nazywany „cementowanie z odwróconym krążeniem” (RCC), ponieważ cementowanie przeprowadza się przed wprowadzeniem orurowania w położeniu tworzącym pierścień zewnętrzny (10, 11). RCC wzbudza obecnie duże zainteresowanie w przemyśle wydobywających ropę i gaz. Jest ono spowodowane rosnącym znaczeniem „zielonego wariantu” w wierceniach i wyposażeniu odwiertu w XXI wieku.

6. Inne rodzaje odwiertów o małych średnicach

Nie tylko odwierty do wydobywania ropy lecz także inne ich rodzaje: do wydobywania gazu, odwierty geotermalne, odwierty do wprowadzania pary oraz odwierty do poszukiwań wód termalnych są wykonywane jako odwierty o małych średnicach. Jednak często występuje niedostatek informacji czy będzie miało miejsce cementowanie odwiertu w celu zabezpieczenia izolacji strefowej.

Kilka ciekawych przykładów odwiertów o małej średnicy wykonanych w ostatnich latach obejmuje:

- Pilotażowy projekt cementowania odwiertów o małych średnicach do wprowadzania pary, wyposażonych w nawijany przewód wydobywczy z powierzchni, co uważano za właściwe

6. Other Types of Slimhole Wells

Not only oilwells, but other well types like gas wells, geothermal wells, steam injection wells and thermal recovery wells, have been drilled as slimhole wells. However, there has often been a dearth of information about whether well cementing has been employed or not for securing zonal isolation.

Some interesting examples of slimhole well drilling in recent years have included:

- A pilot project for cementing slimhole steam injection wells with coiled tubing from the surface, which was considered appropriate in specific applications where the surface location was limited and required slimhole wells to be drilled and completed, was successfully undertaken (12).
- Drilling slimholes for geothermal exploration and small scale power production has produced significant cost benefits. Data obtained from slimholes can be used to lower the risks and costs associated with the more conventional drilling and completion of large diameter geothermal wells (13).
- Slimhole drilling and completions operations have shown that costs can be cut significantly, including those of tubulars, drilling muds, cementing etc. Investigations were carried out to identify technical barriers to the more widespread use of slimhole drilling and completion techniques for US gas wells (14).

7. Basis of Spacer Selection

Spacers are important in alleviating contamination of the cement by drilling muds. The properties of the drilling mud must be adequate for running the casing at a suitable speed. Indeed efficient mud displacement is essential for obtaining a good cement sheath in the narrow annulus. The mud rheology needs to be reduced before the casing is run downhole, if possible by displacing the well to brine. Only low viscosity flushes should be used as spacers, which are consistent with well safety. When running the cement slurry, its rheology must be kept low. The cement slurry should be displaced at the highest possible flow rate into the annulus. Also the casing should be rotated slowly during the displacement, since high speed rotation can greatly increase ECD. The spacer needs to act as a scavenger slurry and as such should normally be weighted for reasons of well control.

8. Summary of Well Cement Selection

Good quality, high sulphate-resisting oilwell cements of Classes G and H can be employed for use in slimhole wells (8). The free lime contents of these cements should be low, so as not to affect the rheological properties of the cement slurries adversely. Optimisation of free lime levels is achieved on a plant-by-plant basis. In most circumstances a useful “rule-of-thumb” guide for free lime limits applies as follows (15):

w przypadku specjalnych zastosowań, w których usytuowanie na powierzchni było ograniczone, co wymusiło wybór odwiertu o małej średnicy, który został z powodzeniem wywiercony i zakończony (12).

- Wiercenie otworów o małych średnicach w pracach poszukiwawczych źródeł geotermalnych i wytwarzanie energii na małą skalę pozwoliły na uzyskanie znacznego zmniejszenia kosztów. Dane dotyczące otworów o małych średnicach można wykorzystać w celu zmniejszenia ryzyka i kosztów związanych z tradycyjnymi wierceniami i ukończeniem odwiertów geotermalnych o dużych średnicach (13).
- Wiercenia o małych średnicach i operacje ukończenia wykazały, że koszty mogą być znacznie mniejsze obejmujące rury, płuczkę wiertniczą, cementowanie i inne. Podjęto badania w celu określenia barier technicznych, utrudniających szersze wykorzystanie wierceń o małych średnicach i technik ich wyposażenia w odwiertach dla gazu w USA (14).

7. Podstawa wyboru cieczy buforowej

Ciecze buforowe mają duże znaczenie w zmniejszaniu zanieczyszczenia cementu płuczką wiertniczą. Właściwości płuczki wiertniczej muszą zapewniać odpowiednią prędkość zapuszczania orurowania. Rzeczywiście skuteczne przemieszczanie płuczki ma podstawowe znaczenie dla uzyskania dobrej osłony cementowej w wąskiej przestrzeni pierścieniowej. Reologia płuczki powinna być zmniejszona przed rozpoczęciem przesuwania rur w dół otworu, jeżeli to możliwe przez przemieszczenie w odwiercie solanki. Jako ciecz buforową można stosować wyłącznie płuczki o małej lepkości, co zapewnia bezpieczeństwo odwiertowi. W trakcie pompowania zaczynu cementowego należy utrzymywać jego niską reologię. Zaczyn cementowy powinien być przemieszczany z możliwie największą szybkością przepływu w przestrzeni pierścieni. Także rurami należy obracać wolno podczas przemieszczania, ponieważ duża szybkość obrotowa może znacznie zwiększyć ECD. Ciecz buforowa powinna działać jako środek przepływający szlam i jako taki powinna zwykle mieć duży ciężar ze względu na stan odwiertu.

8. Podsumowanie wyboru cementu wiertniczego

Dobrej jakości, o dużej odporności na siarczany, cementy wiertnicze klas G i H mogą być stosowane w odwiertach o małych średnicach (8). Zawartość wolnego wapna w tych cementach powinna być mała, aby nie wpływała niekorzystnie na właściwości reologiczne zaczynu cementowego. Optymalizację poziomu wolnego wapna uzyskuje się w wyniku stosowania cementu z różnych zakładów. W większości przypadków można stosować tak zwane „prawo kciuka” w celu wyznaczenia granicznej zawartości wolnego wapna w sposób następujący:

- jeżeli zawartość MgO wynosi 1,5% lub mniej to wolne wapno nie powinno przekraczać 1,0%,

- If the magnesium oxide (MgO) content is 1.5% mass or less, the free lime is limited to 1.0% or below.
- If the MgO content lies above 1.5% mass, the free lime is limited to 0.5% mass or below.

Methods of determining static gel strengths have been given (16) and further information on general well cementing rheology is available (17).

A brief introduction on oilwell cements for slimhole well cementing, which itemises various difficulties involved, has clarified some of the problem areas encountered (18).

The Class G and Class H cements for that are employed for slimhole well cementing should be of low batch-to-batch variability where the particles should be finer than 1 mm (99.99% normally finer than 500 μm). Desired rheological properties commonly include plastic viscosity in the range 0.010-0.015 Pa.s and yield point close to 2.4 Pa in stable slurries. Fluid loss ought to be very low (preferably below 30 ml/30 minutes ISO). Fluid loss control additives are employed for overcoming lost circulation of the cement slurries when they are being pumped downhole into position in the well annuli between the rock formations through which the wells have been drilled and the metal casing/liner (4).

Class G and Class H cements should also have relatively low reactivity at elevated temperatures but, after setting has taken place, hardening should be relatively rapid so as to militate against gas migration. The stability of the well cement slurries must not be compromised. This should ensure that large quantities of additives would not be required for inclusion in slimhole well cementing slurries for pumping into the narrow slimhole annuli. Care in choosing additives for slimhole well cementing slurries is important. Fluid loss controllers need to achieve the desired rheology for the given temperature and pressure conditions. Various proprietary polymer products can achieve this aim, including some latex preparations. Dispersants may be required, but these must not destabilise the cement slurries. Microsilica in appropriate additions can be helpful when incorporated into low density cement slurries for obtaining adequate compressive strength and in stabilising the slurries.

Suitably retarded microfine cements sometimes suffice for use in slimhole well cementing, particularly when there are squeeze cementing (repair) jobs to be undertaken. The high surface areas of these cements (usually ca. 900-1000 m^2/kg or even higher) mean that the main cementing phases are more intrinsically reactive than the straightforward HSR Class G and H cements. However, some consignments of microfine cements may occasionally contain a few particles above 500 μm that could effectively block the slimhole annulus during pumping into position for achieving zonal isolation. As a result, the particle grading analysis should be checked in advance of the job, so as to ensure that the candidate cement is fully fit-for-purpose in slimhole well cementing. Apart from logistical considerations, the generally higher hydraulic activity of microfine cements means that greater retardation needs to be employed to

- jeżeli zawartość MgO jest większa od 1,5% to wolne wapno nie powinno przekraczać 0,5%.

Metoda oznaczania statycznej wytrzymałości żelu jest ujęta w normie angielskiej (16), a dalsze informacje ogólne o znaczeniu reologii w cementowaniu odwiertów można znaleźć w monografii (17).

Krótkie wprowadzenie do zagadnienia cementowania odwiertów o małych średnicach cementami wiertniczymi, co wiąże się z różnymi trudnościami i wyjaśnienie niektórych napotykanymi problemami podawał Bensted (18).

Cementy klas G i H stosowane do cementowania odwiertów o małych średnicach powinny wyróżniać się małą zmiennością w kolejnych dostawach, a ich uziarnienie powinno się składać z ziaren mniejszych od 1 mm (99,99% mniejsze od 500 μm). Pożądanymi właściwościami reologicznymi zaczynów powinny być stabilne i wykazywać lepkość plastyczną w zakresie 0,010 – 0,015 Pa·s, a granicę płynięcia bliską 2,4 Pa. Spadek płynności powinien być bardzo mały (korzystnie 30 ml/30 minut według ISO). Stosuje się domieszki zmniejszające ubytek płynności w celu uniknięcia spadku cyrkulacji zaczynu cementowego w trakcie pompowania w dół odwiertu do przestrzeni pierścieniowej pomiędzy utworem skalnym, w którym wiercono otwór, a metalowym orurowaniem lub rurami traconymi (4).

Cementy klas G i H powinny także wyróżniać się małą reaktywnością w podwyższonych temperaturach, jednak po zakończeniu wiązania ich twardnienie powinno być stosunkowo szybkie tak, aby zapobiegać migracji gazu. Trwałość zaczynów z cementów wiertniczych nie powinna podlegać dyskusji. Oznacza to, że nie powinno się stosować dużych dodatków domieszek do zaczynów cementowych pompowanych do wąskich przestrzeni pierścieniowych w otworach o małych średnicach. Należy z uwagą wybierać domieszki do zaczynów stosowanych do cementowania odwiertów o małych średnicach. Domieszki ograniczające spadki płynności powinny zapewnić pożądaną reologię w warunkach danego ciśnienia i temperatury. Różne polimery mogą zapewnić takie działanie, w tym niektóre preparaty lateksowe. Może także wystąpić potrzeba stosowania domieszek dyspergujących, nie powinny one jednak destabilizować zaczynów cementowych. Odpowiedni dodatek pyłu krzemionkowego może być korzystny w przypadku zaczynów cementowych o małej gęstości, w celu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie i stabilizacji zaczynów.

Cementy o dużej mialkości z odpowiednim opóźniaczem można czasem stosować do cementowania odwiertów o małych średnicach, szczególnie gdy prace mają mały zakres (naprawy). Duża powierzchnia właściwa tych cementów (zwykle około 900-1000 m^2/kg lub więcej) oznacza, że fazy cementowe wykazują większą reaktywność niż klasyczne cementy HSR klas G i H. Jednak, niektóre partie cementów o dużej mialkości mogą czasami zawierać niewielką ilość ziarn większych od 500 μm , które mogą skutecznie blokować przestrzeń pierścieniową otworów o małych średnicach w trakcie pompowania, w miejscach, w których powstaje strefowa izolacja. W związku z tym trzeba z odpowiednim wyprzedzeniem

produce satisfactory setting. These cements have commonly been utilised in squeeze (repair) jobs to slimhole wells (8).

Microfine cements are particularly useful for reducing the transition time between thickening (setting) and hardening, which militates against gas migration and debonding arising in the annulus (9).

Foamed cement is sometimes utilised in slimhole well cementing formulations, so as to give better fluid displacement and cleaning of the wellbore. It is preferable not to under-ream during the downhole operations.

Sometimes ionomer cements are employed in slimhole well cementing, as already mentioned. Acid functionalised polycarboxylates (based upon polyacrylic acid or its derivatives), or polyvinylphosphonic acids are often used as the basis for successful co-polymerisation.

Very little quantitative data are widely available to date on how to cement slimhole wells, whilst still adhering to good cementing practices. The cementing of a 3 1/2-inch liner to a 4 1/8-inch hole in a relatively deep high temperature-high pressure (HTHP) slimhole well that was drilled in a formation with minimal distance between pore- and fracture- pressure gradients, was undertaken. A conventional solids-laden HTHP water-based drilling fluid could not be displaced by the cement slurry without exceeding the pressure limits of the formation. However, a potassium formate (HCO_2K) brine-based HTHP drilling fluid could be displaced with close to 100% efficiency even with sub-optimum cementing practices (like no pipe movement during the cementing, and low annular velocity of drilling fluid at the beginning of the cementing job). The low flat gels together with the thin tough filter cake obtained greatly facilitated mud removal during the well cementing, thus ensuring a good cement sheath with suitable zonal isolation was able to be formed (14).

Through Tubing Rotary Drilling (TTRD) slimhole wells can be zonally isolated by employing swellable materials such as rubbers. These swellables function by making use of the swelling properties of rubber in contact with hydrocarbons, which swell to fill the annulus around the pipe, as alternatives to conventional well cements. Importantly, swellables show no shrinkage and remain durable. They are particularly suitable for running through long horizontal slimhole wells like a 2 7/8-inch liner and milled windows for perforation, where they can be readily run into position without affecting functionality. Thus normal cementing as such and perforation are effectively eliminated.

9. Conclusions

- It is essential that pre-testing of candidate cement slurries be undertaken prior to mixing and to the carrying out of the actual well cementing job. Simulations of the candidate cement slurries can also be of value for supporting the laboratory work undertaken.

przeprowadzać analizę składu ziarnowego w celu uzyskania pewności, że przeznaczony do cementowania cement spełnia w pełni warunki wymagane w przypadku prac w odwiercie o małej średnicy. Niezależnie od rozważań logistycznych, większa aktywność hydrauliczna cementów o bardzo dużej mialkości, oznacza że trzeba zastosować większe opóźnienie, aby zapewnić odpowiednie wiązanie. Te cementy są powszechnie stosowane w pracach naprawczych, w odwiertach o małych średnicach (8).

Cementy o bardzo dużej mialkości są szczególnie przydatne w celu skrócenia czasu pomiędzy tężeniem (wiązanie), a twardnieniem co utrudnia migrację gazu i powstanie rozszczelnień w przestrzeni pierścieniowej (9).

Cementy pieniące są czasem stosowane do cementowania odwiertów o małych średnicach w celu zapewnienia lepszego przemieszczania cieczy i czyszczenia odwiertu. Zaleca się unikać stosowania za małej gęstości w trakcie operacji w dole odwiertu.

Jak już wspomniano, czasami stosuje się cementy polimerowe do cementowania odwiertów o małych średnicach. Polikarboksylany (oparte na kwasie poliakrylowym i jego pochodnych) lub kwas polivinylofosfonowy, które są często stosowane, łatwo ulegają polimeryzacji.

Do chwili obecnej, jest bardzo mało danych ilościowych na temat cementów stosowanych do odwiertów o małych średnicach, o potwierdzonej przydatności w operacjach cementowania. Podjęto cementowanie $3 \frac{1}{2}$ calowych rur traconych w $4 \frac{1}{8}$ calowych otworach w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia (HTHP) w odwiertach o małych średnicach, które były wiercone w utworach przy minimalnej różnicy pomiędzy gradientem ciśnienia w porach i ciśnieniem szczelinowania. Klasyczne wiercenia HTHP z zastosowaniem wodnych płuczek wiertniczych, nie mogą być zastąpione zaczynami cementowymi bez przekroczenia granicznego ciśnienia utworu. Jednak płuczka wiertnicza oparta na solance mrówczanu potasu przy HTHP może zostać zastąpiona w stopniu bliskim 100%, nawet gdy operacja cementowania nie przebiega w korzystnych warunkach (na przykład bez przemieszczania rur podczas cementowania i małej szybkości przepływu pierścieniowego na początku cementowania). Mała gęstość żeli wraz z odpornym na obciążenia dynamiczne utworzonym plackiem filtracyjnym znacznie ułatwia usunięcie iltu w trakcie cementowania odwiertu, zapewniając tym samym uzyskanie dobrej powłoki cementowej, dającej odpowiednią izolację strefową (14).

W wyniku wiercenia obrotowego z przewodem nawijanym można wprowadzić strefową izolację odwiertów o małych średnicach stosując pęczniące materiały, na przykład gumy. To pęcznienie uzyskane z wykorzystania właściwości pęczniących gum w kontakcie z węglowodanami, które pęcznią wypełniając przestrzeń pierścieniową wokół rury stanowi alternatywę w stosunku do klasycznych cementów wiertniczych. Najważniejsze, że rozszerzające się gumy nie wykazują skurczu i są trwałe. Są one szczególnie przydatne w operacjach prowadzenia długich poziomych odwiertów o małych średnicach, na przykład $2 \frac{7}{8}$ calowe rury tracone z wywierconymi

- Slimhole wells are more environmentally friendly than conventional wells, because of smaller scale logistics in equipment and materials, for the employment of drilling and completion fluids, cements, additives and debris (from drilling cuttings) that are likely to accumulate in the operations.
- Slimhole wells are also very cost effective and are useful in developing extended reach and horizontal wells from existing depleted or abandoned wells (re-entry wells) to facilitate more production from them.
- Sidetracking with a slimhole liner, cemented to case off (zonally isolate) damaged pipe (that leads to entry of unwanted formation fluids into the annulus along with gas migration) has proven to be useful in repairing steam recovery wells, with the damaged pipe being plugged-and-abandoned.
- Furthermore, slimhole wells can be utilised in HTHP environments and also where there is limited space for mechanical equipment. In addition, it is possible that slimhole wells could be used for CO₂ flood injection holes for environmental reasons. This is an area where more research and development work are required.
- Reverse circulation cementing (RCC) is the way forward for cementing many complex slimhole wells in order to achieve zonal isolation and long term durability for the respective cement sheaths. ECD is of course very complicated and each slimhole well being cemented has to be considered on an individual basis. Computer modelling is very important and the difficulties associated with ECD must be taken into consideration for attaining reliable modelling with slimhole well cementing.
- It is clear that slimhole wells, despite the complications of the science and engineering involved, are likely to be increasingly employed in the future for technical, environmental and financial reasons.
- The cement types utilised for securing zonal isolation with slimhole wells have been addressed. In particular, it should be re-emphasised that pre-testing in the laboratory is a key prerequisite for securing good well cementing jobs in slimhole wells.

Literatura / References

1. J. Bensted: Special oilwell cements. World Cement 23, No. 11, 40-46 (November 1992).
2. Anon.: Oilfield slimhole drilling technology improving. Oil & Gas Journal 90, No. 47, 77-78, (23 November 1992).
3. L. Foster: Slimhole casing program adapted to horizontal wells. Oil & Gas Journal 91, No. 36, 76-81 (6 September 1993).
4. J. Bensted: Oilwell cements for slimhole wells. World Cement 25, No. 8, 45-48, 61-62, 71-73 (August 1994).
5. US Department of Energy: 'Environmental Benefits, Exploration and Production Technology'. DOE, Washington DC (1999).
6. J. Bensted: Oilwell cements for horizontal wells. World Cement 27, No. 5, 76-78 (May 1996).
7. J. Bensted: Oilwell cements for multilateral wells. World Cement Research and Development 28, No. 11, 70-74 (1997).

otworami perforacyjnymi, w których to przypadkach mogą one zostać rozmieszczone w prawidłowych położeniach, bez utraty swojej przydatności. W związku z tym klasyczne cementowanie i perforacja nie muszą być stosowane.

9. Wnioski

- Ważne znaczenie ma wstępne zbadanie zaczynów cementowych przeznaczonych do cementowania odwiertów, przed ich zmieszaniem. Wytwarzanie w laboratorium zaczynów cementowych ma także duże znaczenie.
- Odwierty o małych średnicach są bardziej przyjazne dla środowiska od konwencjonalnych, ponieważ wymagają mniej wyposażenia i materiałów w stosowanych do wiercenia cieczach, cementach, domieszkach oraz powstaje mniej odpadów w trakcie prowadzenia cementacji.
- Odwierty o małych średnicach są tańsze i mogą być z powodzeniem stosowane w rozwijaniu głębszych i poziomych odwiertów z już istniejących, opuszczonych odwiertów w celu zwiększenia wydobycia z nich.
- Boczne wprowadzenie rur traconych o małych średnicach, cementowanych (strefowa izolacja) w przypadku uszkodzonych rur (stanowią zagrożenie przedostawania się niepożądanych cieczy do przestrzeni pierścieniowej, a także migracji gazu) okazało się korzystne do napraw odwiertów do wprowadzania pary, w przypadku uszkodzonych rur, które zostały zaślepienie i opuszczone.
- Odwierty o małych średnicach mogą być stosowane w środowisku HTHP, a także tam gdzie jest ograniczone miejsce dla urządzeń mechanicznych. Dodatkowo w odwiertach o małych średnicach mogą znajdować się otwory do intensywnego załączania CO₂ z powodów środowiskowych. Jest to obszar, w którym istnieje potrzeba większej ilości badań i prac rozwojowych.
- Cementowanie z odwrotną cyrkulacją (RCC) jest dalszym etapem w cementowaniu złożonych odwiertów o małych średnicach w celu uzyskania strefowej izolacji o długiej trwałości warstwy cementowej. ECD stwarza oczywiście skomplikowaną sytuację i cementowanie każdego odwiertu o małej średnicy musi być traktowane indywidualnie. Modelowanie komputerowe ma bardzo duże znaczenie i trudności towarzyszące ECD muszą być wzięte pod uwagę w celu otrzymania rzeczywistego modelu cementowania odwiertu o małej średnicy.
- Jest to oczywiste, że odwierty o małych średnicach, pomimo że są złożonymi zagadnieniami z naukowego i inżynierskiego punktu widzenia, będą stosowane w coraz większym stopniu w przyszłości z uwagi na techniczne, środowiskowe i finansowe przyczyny.
- Zwrócono uwagę na rodzaje cementów stosowanych w celu zapewnienia izolacji strefowej w odwiertach o małych średnicach. W szczególności należy podkreślić, że badania laboratoryjne są kluczem do zapewnienia dobrych prac cementacyjnych w odwiertach o małych średnicach.

8. J. Bensted: Developments with oilwell cements, in 'Structure and Performance of Cements', 2nd Edition, (Editors: J. Bensted and P. Barnes), pp. 237-252. Spon Press, London and New York (2002).

9. J. Bensted: Cementy wiertnicze. Część 3. Plastyczne mieszanki cementu wiertniczego o zwiększonej trwałości długookresowej. / Oilwell cements. Part 3. Ductile oilwell cement compositions for better long term durability. Cement-Wapno-Beton 10/72, 13-32 (2005).

10. J. J. Nahm, A. H. Hale and K. M. Cowan: Process to cement casing in a wellbore. US Patent 07/964976 (26 July 1994).

11. P. Head, D. Turner, T. Hanson, S. Al Rawahi and G. Cameron: Slimwells without the pain. SPE/IADC Paper 52795, 12pp. SPE/IADC Conference, Amsterdam, (9-11 March 1999).

12. R. Romagno and R. Walker: Coiled tubing moves to commercial viability. World Oil 215, No. 12, 48-53 (1994).

13. J. Finger and R. Jacobson: Slimhole drilling, logging and completion technology – An update. Proceedings, World Geothermal Congress 2000, Kyuzhu-Tohoku, Japan, 28 May-10 June, pp. 2335-2339, (2000).

14. J. P. M. van Vliet, D. L. Bour and J. E. Griffith: Slimhole cementing: Analysis and possible solution of the problem. Asia Pacific Drilling Technology 1996 Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 9-11 September 1996, pp. 71-78 (1996).

15. British Standards Institution: BS EN ISO 10426-2. Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing. Part 2: Testing of well cements. (National Annex NA.3 Free lime), BSI, London (2003).

16. British Standards Institution: BS EN ISO 10426-6, Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing. Part 6. Methods for determining the static gel strength of cement formulations. BSI, London, (2008).

17. E. B. Nelson and D. Guillot: 'Well Cementing', 2nd Edition. Schlumberger, Sugar Land, Texas (2006).

18. J. Bensted: Oilwell cements for slimhole well cementing. Extended Abstracts, 4pp. Cement and Concrete Science Conference, The University of Manchester, (15-16 September 2008).