

Prof. John Bensted¹, Josephine R. Smith²

¹ Department of Chemical Engineering, UCL, London WC1E 7JE, UK

² The Hannington Group, Slough, UK

Cementy wiertnicze. Część 9. Zagadnienia reologii w cementowaniu otworów wiertniczych

Oilwell Cements. Part 9. Aspects of Well Cementing Rheology

1. Wprowadzenie

Termin reologia odnosi się do lepkości (lub ciekłości) zaczynu cementowego w trakcie mieszania i pompowania w układzie. W przypadku stosowania cementu wiertniczego jest on zwykle mieszany w trakcie podawania z silosu, w którym jest przechowywany (na lądzie lub na morzu), do strumienia wody o dużej szybkości (mieszalnik Venturiego). Zaczyn jest następnie podawany do zbiornika wyposażonego przeważnie w sito, usuwające duże cząstki. Ze zbiornika pobierany jest przez zasysanie rurą (orurowanie), które następnie przechodzi w ciśnieniowe pompowanie tego zaczynu przez rury okładzinowe do dolnej części otworu, a stąd do przestrzeni pierścieniowej pomiędzy metalowym orurowaniem i zewnętrzną ścianą otworu (nazywaną inaczej pierścieniem). Zaczyn cementowy w przestrzeni pierścieniowej powinien znajdować się normalnie w ruchu turbulentnym, w celu zapewnienia całkowitego jego wypełnienia i zapewnienia dobrego wiązania stalowego orurowania ze ścianą odwiertu. Oznacza to, że zaczyn cementowy powinien posiadać małą lepkość możliwie przez długi okres aż nastąpi gęstnienie (wiązanie). Szczególnie zaczyn cementowy powinien zapewniać łatwe jego przemieszczanie po okresie pozostawiania bez ruchu w dolnej części otworu, w przypadku awarii pompy.

2. Wybrane informacje podstawowe

Reologia jest oczywiście bardzo ważna w cementowaniu otworów wiertniczych, szczególnie w aspekcie pompowania zaczynu cementowego w dół odwiertu do przestrzeni pierścieniowej, w celu zabezpieczenia strefowej izolacji i długiej trwałości odwiertów. Jedynym obowiązkowym badaniem właściwości reologicznych jest stosowana w Brazylii norma dotycząca cementów wiertniczych NBR 9831, w którym to kraju właściwości te były stosowane z powodzeniem w celu charakteryzowania cementów wiertniczych w laboratorium (1). Tylko jedna fabryka w Brazylii produkuje obecnie cement wiertniczy klasy G (Alvorada), a certyfikację jakościową i kontrolę jakości zapewnia Petrobras (państwowa firma eksploatująca ropę) za pośrednictwem swojego centrum technicznego Petrobras-CENPES w Ilha de Fundão, w Rio de Janeiro. Bada-

1. Introduction

The term rheology relates to the viscosity (or fluidity) of the cement slurry when subject to mixing and pumping through the system. When the oilwell cement is employed, it is usually mixed by feeding it from a storage silo (onshore or offshore) into a fast moving stream of water (a Venturi type mixer). The cement slurry then moves into a slurry box that usually incorporates a screen to remove large particles. From here it is transferred by suction through a pipe (casing), which then subjects it to positive pressure for pumping through the casing to the bottom of the hole and thence into the annular space between the metal casing and the drilled out walls of the borehole (otherwise known as the annulus).

The cement slurry in the annulus should normally be in turbulent motion to ensure the complete filling of the annulus to give a good bond with both the steel casing and the wall of the borehole as drilled. This means that the cement slurry must have a low viscosity for as long as possible before the thickening (setting) action takes place. Importantly the cement slurry must be easy to move after a period of quiescence downhole, such as being caused by a pump breakdown.

2. Some Background Information

Rheology is of course very important in well cementing from the viewpoint of pumping the cement slurries into the downhole annular spaces in order to secure zonal isolation with long term durability of the well. The only mandatory tests for rheological behaviour are utilised in the Brazilian well cement standard NBR 9831, where rheological parameters have been successfully employed for characterising well cements in the laboratory (1). Only one plant in Brazil is currently dedicated to produce Class G oilwell cements (Alvorada) and the quality assurance and quality control is monitored by Petrobras (the state oil company) in their technical centre Petrobras-CENPES at Ilha de Fundão, Rio de Janeiro. The testing within the Petrobras-CENPES laboratories subsequent to manufacture is advantageous from the quality assurance/quality control (QA/QC) point of view.

nia w laboratoriach Petrobras-CENPES tej produkcji jest korzystne z punktu widzenia kontroli i zapewnienia dobrej jakości.

Posiadanie scentralizowanej produkcji cementu i jego badania w tych szczególnych okolicznościach znacznie ułatwia ustalenie właściwości reologicznych dotyczących produkcji cementów wiertniczych niż gdyby więcej cementowni było objęte tymi wytycznymi produkcyjnymi. Wynika to z szerokiej bazy obejmującej wiele technologii produkcji, zmienne surowce do wytwarzania klinkieru, różne rodzaje paliw, specyficzny gips, warunki składowania itd. i z tego względu cement z jednego zakładu ma obecnie specyficzne cechy odnośnie do reaktywności i innych właściwości.

W Brazylii są wytwarzane dwie klasy cementu wiertniczego spełniające wymagania normy NBR 9831 (1):

- Klasa G, HSR (bardzo odporny na siarczany) i MSR (średnio odporny na siarczany) z podobnymi ograniczeniami jakie są zawarte w międzynarodowej normie ISO 10426-1 (2), poza właściwościami reologicznymi opisanymi poniżej.
- Specjalna klasa z większą zawartością C_3A (maksimum 7%) i C_3S , z zawartością w klinkierze w bardzo wąskim zakresie, ta specjalna klasa ma właściwą ilość wody 46% w odróżnieniu od 44%, które zawarte są w wymaganiach dla klasy G.

Specjalna klasa cementu została wprowadzona w 2000 roku na podstawie doświadczenia zdobytego w ciągu 15 lat stosowania miejscowego cementu do cementowania odwiertów w północno-wschodniej Brazylii, który był dosyć podobny pod pewnymi względami do cementu klasy A, według ISO. Ta cementownia wytwarzała cement o dobrej jednorodności poszczególnych partii w związku z tym Petrobras oparł parametry produkcji na tym szczególnym klinkierze we wprowadzeniu specjalnej klasy cementu, który ma mniejszą powierzchnię właściwą niż cement klasy G. Cementy obu tych klas G i specjalnej muszą mieć właściwości reologiczne podane w tablicy 1.

Jest prawdopodobne, że w przyszłości norma NBR 9831 zostanie zastąpiona przez normę ISO 10426-1 w portugalskiej wersji językowej, z badaniami reologicznymi i innymi stosowanymi w Brazylii, w formie Aneksu krajowego.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE CEMENTÓW HSR/MSR KLASY G I SPECJALNEJ

RHEOLOGICAL PROPERTIES FOR HSR/MSR CLASS G AND SPECIAL CLASS CEMENTS

Właściwość / Property	Wartość normatywna / Normative Limits
Początkowa wytrzymałość żelu mieszanego z prędkością 3 obrotów na minutę przez 10 s w 27°C i 52°C Initial gel strength @ 3 rpm after 10 seconds at 27 and 52°C	12 Pa max.
Końcowa wytrzymałość żelu mieszanego tak samo przez 10 min w 27°C i 52°C Final gel strength @ 3 rpm after 10 minutes at 27 and 52°C	16.8 Pa max.
Lepkość plastyczna w 27°C i 52°C Plastic viscosity at 27 and 52°C	0.055 Pa.s max.
Granica ścinania w 27°C Yield strength at 27°C	14.4 to 33.5 Pa
Granica ścinania w 52°C Yield strength at 52°C	14.4 to 38.3 Pa

Having centralisation for cement production and testing in this particular circumstance is much easier for establishing mandatory rheological parameters involved with oilwell cement manufacture than if more cement plants had been involved in the manufacturing criteria employed to produce cements. This arises because on a global basis, due to different cement manufacturing processes, differences in raw materials for clinker production, the wide range of kiln fuels, differences in gypsums, storage conditions etc., all cement plants are actually unique in terms of the reactivity and performance that arise from the cements made.

Two Classes of oilwell cements are produced in Brazil to the national standard NBR 9831 (1):

- Class G, HSR (high sulphate resistant) and MSR (medium sulphate resistant) with similar limits as for the international standard ISO 10426-1 (2) apart from the rheological parameters described below.
- Special Class, with higher C_3A content (maximum 7%) and C_3S content within a very narrow range in the clinker, the Special Class cement having a water content of 46% unlike the 44% specified for Class G cement.

Special Class cement was developed in 2000 from experience gained in more than 15 years utilising a local well construction cement in northeastern Brazil, which has been fairly similar in some ways to an ISO Class A cement. The plant in question has been producing a cement with good homogeneity between production batches, so Petrobras set the production parameters based upon this particular clinker in developing the Special Class cement, which is coarser in surface area than Class G cement. Both Class G and Special Class cements need to satisfy the following rheological parameters, as given hereunder:

It is likely that in the future the well cement standard NBR 9831 will be superseded by a Portuguese language version of ISO 10426-1, with the rheological and some other tests used in Brazil being contained in a National Annex.

Due to the nature of rheology, which is highly dependent upon the precise conditions that the cement slurries are exposed to in being

W związku z właściwościami reologii, która w dużym stopniu zależy od określonych warunków, jakim zaczyn cementowy jest poddawany w trakcie pompowania w dół odwiertu do przestrzeni pierścieniowej, nie jest obecnie możliwe wyznaczanie normatywnych granic parametrów reologicznych na uniwersalnej podstawie. Jedynym wymaganym parametrem reologicznym w normie ISO 10426-1 (2) dla cementu wiertniczego jest graniczna lepkość wynosząca 30Bc (jednostki lepkości Beardena) w pomiarze czasu zagęszczania, według ISO w kolejności badanie 4-6, który obejmuje cementy klas A-D oraz G i H (1 Bc odpowiada w przybliżeniu jednemu puazowi).

Jednak pierwsza norma ISO 10426-6 (3) poświęcona wyłącznie reologii ukazała się w 2008 roku. Jest to rodzaj opisu technicznego, ujętego w formie normy, która opisuje dokładniej metody oznaczania wytrzymałości żelu cementów wiertniczych w stanie spoczynku (nazywanego dalej statyczną wytrzymałością strukturalną) i daje pożyteczne podstawy tego zakresu badań, obejmujące także aparaturę. Informacje te korzystnie uzupełniają dane zawarte w ISO 10426-2 (4) i mogą być wykorzystywane w badaniach cementów wiertniczych, razem z podstawami do modelowania ich reologicznych właściwości. W artykule opisano niektóre metody badań cementów wiertniczych za pomocą wiskozymetrów obrotowych w celu oznaczenia właściwości reologicznych, wytrzymałości strukturalnej i innych związanych z nią, lub wynikających z niej zjawisk.

Charakterystyka zmian statycznej wytrzymałości strukturalnej (SGS) zaczynu cementowego jest ważnym parametrem w specyficznych warunkach cementowania. Obejmują one ograniczenie płytkich dopływów wód, operacje wykonywania korków cementowych oraz pewne przypadki przepływu w przestrzeni pierścieniowej. Wyznaczenie charakterystyki wytrzymałości żelu zaczynu cementowego pozwala użytkownikowi ustalić czy wybrany cement będzie dobrze dobrany dla szczególnego zastosowania. Historycznie SGS zaczynu cementowego została oznaczona za pomocą specjalnego wiskozymetru obrotowego, który miał zewnętrzny cylinder obrotowy. W tym urządzeniu wytrzymałość żelu jest mierzona po pozostawieniu zawiesiny cementowej w stanie spoczynku przez 10 s, a także po 10 min. W nowszych czasach specjalistyczne aparaty (obejmujące typ obrotowy, obrotowy pracujący z przerwami, a także ultradźwiękowy) są stosowane do pomiarów wzrostu statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu cementowego.

Sprawozdanie z badań SGS z zastosowaniem tych trzech rodzajów aparatów zostało podane w międzynarodowej normie ISO 10426-6 2008. Przemysł naftowy i gazowniczy – cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 6: Metody określania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynów cementowych (3).

Należy zwrócić uwagę na następujące zagadnienia:

- W związku z różnicą wymiarów próbki, budowy aparatu i metody oznaczenia SGS może występować znaczne odchylenie otrzymanego wyniku w przypadku zastosowania tych trzech

pumped downhole into position in the well annulus, it is unrealistic to set normative limits for rheological characteristics on a universal basis at present.

The only mandatory limits for rheology in the well cement specification ISO 10426-1 (2) are the viscosity limits of 30 Bc (Bearden units of consistency) in the thickening time tests of ISO Schedules 4-6, which cover the Cement Classes A-D plus G and H. (1 Bc is approximately 1 poise unit).

However, the first ISO standard dedicated exclusively to rheology ISO 10426-6 (3) was published in 2008. This is a technical report type of standard that delves into greater detail with methods for determining the static gel strength of well cementing formulations and gives useful background information to the subject, including test equipment. Such information usefully supplements that given in ISO 10426-2 (4) for utilising in the actual testing of oilwell cements, along with a basis for modelling their rheological behaviour. Here, some test procedures for oilwell cements for using rotational viscometers in determining rheological properties, gel strengths and other related or consequential phenomena have been given.

Characterising the static gel strength (SGS) development of a cement slurry is an important design parameter in specific cementing environments. These include shallow water flow mitigation, plugging operations and in certain annular flow circumstances. Determining the gel strength characteristics of a cement slurry allows the user to ascertain if the cement design is fit for a particular intended purpose. Historically the SGS of a cement slurry has been determined by a couette-type of rotational viscometer, which has a rotating outer cylinder. Here the gel strength is typically measured after the cement slurry has been left undisturbed for 10 seconds and again after resting for 10 minutes. In more recent times specialised instruments (including rotation-type, intermittent rotation-type and ultrasonic-type) have been utilised to measure the gel strength development of a static cement slurry.

The testing protocol for determining SGS employing these three types of instruments have been set out in the international standard ISO 10426-6:2008 *Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing – Part 6: Methods for determining the static gel strength of cement formulations* (3).

Note the following:

- Owing to differences in size of sample, configuration of apparatus and method of SGS determination, there can be considerable variance in results obtained by the aforementioned three types of apparatus. *Caution should be invoked when using SGS development testing results as the single or predominant engineering parameter of a cement slurry design and in technical evaluation.*
- Static gel strength (SGS) is a shear strength (stress) measurement derived from the pressure required to move a gelled fluid through a pipe or annulus of known length or geometry in Pa (or lbf/100ft²).

rodzajów aparatów. Trzeba zachować ostrożność przy wykorzystaniu wyników pomiarów SGS jako jedyne dominującego czynnika inżynierskiego do wyboru zaczynu cementowego i do jego technicznej oceny.

- Statyczna wytrzymałość strukturalna zaczynu jest wytrzymałością na ścinanie (naprężenie) wyznaczoną z ciśnienia (Pa) potrzebnego do wprowadzenia w ruch żelowej cieczy w orurowaniu lub przestrzeni pierścieniowej o znanej długości lub geometrii.
- Krytyczna statyczna wytrzymałość strukturalna zaczynu jest szczególną statyczną wytrzymałością wyrażoną w Pascalach żelu cementowego, w którym została osiągnięta hydrostatyczna równowaga ciśnieniowa pomiędzy niszczącym ciśnieniem hydrostatycznym przeniesionym z kolumny zaczynu cementowego lub innej cieczy w przestrzeni pierścieniowej i ciśnieniem w porach utworu skalnego.
- Okres krytycznej statycznej wytrzymałości strukturalnej jest czasem wymaganym do przejścia zaczynu cementowego z krytycznej statycznej wytrzymałości strukturalnej do wytrzymałości wynoszącej 250 Pa.

3. Wiskozymetr obrotowy do pomiaru statycznej wytrzymałości strukturalnej

Aparat składa się z komory ciśnieniowej, która może być ogrzewana, i w której może być wytwarzane ciśnienie odwzorowujące warunki panujące w odwiercie. SGS jest obliczana z momentu obrotowego potrzebnego do wprowadzenia w ruch obrotowy z bardzo małą szybkością mieszadła, o znanej geometrii. Prędkość obrotowa mieszadła w okresie mieszania podczas pomiaru SGS wynosi zwykle $9,2 \cdot 10^{-6}$ obrotu/s ($0,2^\circ/\text{min}$). Początkowe mieszanie, które odtwarza wprowadzanie żelu do odwiertu powinno być prowadzone z szybkością $2,5 \pm 0,25$ obrotu/s (150 ± 15 obrotu/min). Kalibrację należy przeprowadzić zgodnie z instrukcją wytwórcy.

W tej metodzie w celu pomiaru statycznej wytrzymałości zaczynu cementowego wiskozymetr jest wyposażony w mieszadło magnetyczne o małym tarcu oraz w układ mierzący moment obrotowy połączony z mieszadłem. Jest mało prawdopodobne, aby wolny ruch mieszadła hamował wzrost wytrzymałości strukturalnej, a równocześnie umożliwia on przeprowadzenie pomiaru momentu obrotowego.

Podczas okresu mieszania z prędkością obrotową podaną w normie ISO (jak w normie ISO 10426-2) pomiar powinien określać konsystencję zaczynu cementu wiertniczego. Nie będzie to dokładnie konsystencja zaczynu, gdyż mieszadło nie jest zgodne z wymiarami podanymi w ISO dla mieszadła stosowanego do pomiaru czasu gęstnienia zaczynu cementowego.

Pomiar SGS stanowi symulację końcowego wprowadzania zaczynu do odwiertu. Prędkość obrotowa jest zmieniona z $2,5 \pm 0,25$ obrotu/s (150 ± 15 ob./min) do $9,2 \cdot 10^{-6}$ obrotów/s ($0,2^\circ/\text{min}$), lub do innej dopuszczalnej szybkości. Utrzymywana temperatura i ciśnienie odpowiada strefie, która nas interesuje. Rejestruje się czas do osiągnięcia SGS: 50 Pa, 100 Pa, 150 Pa, 200 Pa i 250 Pa.

- Critical static gel strength (CSGS) is the specific static gel strength, measured in Pa (or lbf/100ft²), of a cement in which hydrostatic pressure equilibrium is reached between the decayed hydrostatic pressure transmission of the cement column (and other fluids in the annulus) and the pore pressure of the formation.
- The critical static gel strength period (CSGGP) is the time interval required for the cement to progress from the critical static gel strength value to a static gel strength of 250 Pa (500 lbf/100 ft²).

3. Rotating-Type Static Gel Strength Apparatus

The apparatus contains a pressure chamber that can be heated and pressurised according to a simulated well schedule. The SGS is calculated from the torque required to rotate a paddle of known geometry at very low speed. The rotation speed of the paddle during the SGS stirring portion of the test is normally a continuous $9.2 \cdot 10^{-6}$ r/second ($0.2^\circ/\text{minute}$). The initial stirring to simulate placement in the well shall be conducted at 2.5 ± 0.25 r/s (150 ± 0.15 r/minute). Calibration shall be according to the manufacturer's instructions.

In this procedure for determining the static gel strength of the cement slurry, a consistometer containing a low-friction magnetic drive and torque-measuring system coupled to the paddle is employed. The slow movement of the paddle does not appear to inhibit gel strength development, but usefully does allow torque measurements to be undertaken.

During the time of stirring at ISO rotational speeds (as in the standard ISO 10426-2), the test will give an indication of the well cement slurry consistency. It will not be an exact slurry consistency, since the paddle does not conform to the ISO dimensions for a paddle used to determine the thickening time of a cement slurry.

SGS determination is carried out at the end of the slurry placement simulation. The rotational speed is changed from 2.5 ± 0.25 r/seconds (150 ± 15 r/minutes) to $9.2 \cdot 10^{-6}$ r/seconds ($0.2^\circ/\text{minutes}$) or other permissible rotation speed. Maintain circulating temperature and pressure at the zone of interest. Record the time to 50 Pa (100 lbf/100 ft²), 100 Pa (200 lbf/100 ft²), 150 Pa (300 lbf/100 ft²), 200 Pa lbf/100 ft²) and 250 Pa (500 lbf/ft²) SGS. Where applicable, determine the critical static gel strength period (CSGGP) by measuring the time required for the cement slurry to progress from the critical static gel strength (CSGS) value to an SGS of 250 Pa (500 lbf/ft²). The type of apparatus used to make the SGS determination and rotational speed should also be reported.

4. Ultrasonic-Type Static Gel Strength Apparatus

The cement slurry to be tested is maintained in a static condition at a controlled temperature and pressure inside a pressure chamber capable of measuring the acoustic properties of the cement slurry. A first transducer generates an acoustic signal which is transmitted

W przypadkach, w których można wykorzystać te dane, mierzy się również okres krytycznej, statycznej wytrzymałości strukturalnej przez pomiar czasu niezbędnego dla przejścia zaczynu cementowego od tej wytrzymałości krytycznej do osiągnięcia przez żel wytrzymałości statycznej równej 250 Pa. Należy również podać rodzaj stosowanego aparatu do pomiaru SGS i prędkość obrotową.

4. Ultradźwiękowy aparat do pomiaru statycznej wytrzymałości strukturalnej

Zaczyn cementowy przed badaniem utrzymuje się w statycznych warunkach i w kontrolowanej temperaturze i ciśnieniu w komorze ciśnieniowej, wyposażonej w urządzenie do pomiaru akustycznych właściwości zawiesiny cementowej. Pierwszy przetwornik wytwarza sygnał akustyczny, który przechodzi przez próbkę. Drugi przetwornik mierzy i rejestruje amplitudę sygnału, po przejściu przez próbkę. Dane te zostają następnie przetworzone i SGS oznacza się w oparciu o algorytm wykorzystujący korelację amplitudy sygnału akustycznego z SGS. Algorytmy, które są zastrzeżone, pozwalają na wykorzystanie pomiarów fal akustycznych przechodzących przez zawiesinę cementową do oceny statycznej wytrzymałości strukturalnej. Rodzaj aparatu ultradźwiękowego stosowanego do pomiaru SGS i prędkość obrotowa powinny także być zanotowane.

W celach bezpieczeństwa, jeżeli temperatura przekracza 90°C, zaczyn cementowy należy ochłodzić do około 90°C przed usunięciem z ciśnieniowego wiskozymetru. Zaczyn cementowy w pojemniku ciśnieniowym aparatu powinien być ochłodzony i należy przeprowadzić pomiar jego czasu gęstnienia. Jeżeli stosuje się w trakcie prac mieszanie przez pewien okres pewnej partii to odpowiednie postępowanie badawcze powinno zawierać ten czas. W tym czasie należy utrzymywać ciśnienie atmosferyczne. Szybkość mieszania powinno się utrzymywać na poziomie $2,5 \pm 0,25$ obrotu/s. Jeżeli nie stosuje się mieszania pewnej partii zawiesiny ten etap można pominąć.

Podobnie jak w przypadku wiskozymetru obrotowego do pomiaru statycznej wytrzymałości strukturalnej wyniki powinny być rejestrowane wraz z upływem czasu. Postępowanie takie wiąże się z doprowadzeniem badania do tych samych wielkości Pa, niezależnie od stosowanego rodzaju aparatu pomiarowego i warunków przechowywania próbki.

5. Pomiar statycznej wytrzymałości strukturalnej za pomocą rotacyjnego aparatu, w którym mieszadło pracuje z przerwami

Badana próbka zaczynu cementowego do cementowania odwiertu jest przetrzymywana w statycznych warunkach w komorze ciśnieniowej, w kontrolowanej temperaturze i ciśnieniu. SGS jest obliczana na podstawie momentu obrotowego wprowadzającego mieszadło o znanej geometrii w ruch obrotowy przerywany, z bardzo małą prędkością. Mieszadło w tym przyrządzie jest wprowadzane w ruch obrotowy z prędkością $1,6 \times 10^{-4}$ obrotu/s (0,01 obrotu/min)

through the sample. A second transducer measures and records the amplitude of the acoustic signal after it transits the sample. This data is then processed and the SGS of the sample is determined according to an algorithm correlating acoustic signal amplitude to SGS. The algorithms, which are proprietary, are utilised to transform the acoustic waveforms transmitted through the cement slurry into evaluations of static gel strength. The ultrasonic-type static gel strength apparatus used to make the SGS determination and rotational speed should also be reported.

For safety, if the conditioning temperature is greater than 90°C, the cement slurry should be cooled to approximately 90°C before removing from the pressurised consistometer. The cement slurry within the container in the pressurised consistometer should be cooled and a thickening time test undertaken. If there is a batch mixing time to be used for the job, the appropriate test schedule should include this time period. The slurry should be exposed to the anticipated temperature conditions during the batch mixing time. The pressure at this time should be atmospheric. The stirring should be maintained at 2.5 ± 0.25 r/seconds (150 ± 15 r/minutes). If there is no batch mixing time, this step can be omitted.

As with the rotating-type static gel strength apparatus, the SGS value should be recorded, along with the elapsed time. This arises because the initiation of the test to the same Pa values, together with the type of apparatus for making the SGS determinations and the type of conditioning instrument employed is appropriate.

5. Intermittent Rotation-Type Static Gel Strength Apparatus

The well cement slurry to be tested is maintained in a static condition in a pressure chamber at a controlled temperature and pressure. The SGS is calculated from the torque required to rotate a paddle of known geometry intermittently at very low speed. This apparatus operates intermittently at 1.6×10^{-4} r/seconds (0.01 r/minutes) for 6 seconds every 3 minutes during the SGS-testing phase. The intermittent rotation-type static gel strength apparatus should be calibrated according to the manufacturer's instructions.

The well cement slurry is placed in the container of the pressurised consistometer and a thickening time test begun. The expected time-to-bottom and expected placement time to displace the cement slurry to the zone of interest should be calculated and the cement slurry ramped up to the bottom hole circulating temperature (BHCT) and bottom hole pressure (BHP) in the expected time-to-bottom. After the circulating temperature at the zone of interest is reached, the specified temperature and pressure shall be held for 5 minutes ± 30 seconds to allow for temperature stabilisation to occur.

The time interval to ramp to the BHCT/BHP at the zone of interest is the expected placement time minus the expected time-to-bottom. The stirring shall be maintained at 2.5 ± 0.25 r/seconds (150 ± 15 r/minutes). For safety, if the conditioning temperature is greater than 90°C, the cement slurry should be cooled to approximately

w ciągu 6 s po każdym 3 minutach, w trakcie badania SGS. Ten aparat powinno się wykalibrować zgodnie z instrukcją producenta.

Zaczyn do cementowania umieszcza się w pojemniku w ciśnieniowym wiskozymetrze i rozpoczyna się badanie czasu gęstnienia. Trzeba obliczyć potrzebny czas do transportu zaczynu cementowego do końca otworu i jego przemieszczanie w cementowanej strefie i zaczyn należy podgrzać do oczekiwanej temperatury i ciśnienia panujących w głębi odwiertu. Po osiągnięciu temperatury panującej w cementowanej strefie, tę temperaturę i ciśnienie należy utrzymywać przez 5 minut \pm 30 s, w celu zapewnienia stabilizacji tej temperatury.

Przedział czasu do osiągnięcia tych warunków w strefie cementowania jest oczekiwanym czasem transportu do strefy cementowania minus czas transportu zaczynu do końca odwiertu. Mieszanie powinno odbywać się z szybkością $2,5 \pm 0,25$ obrotów/s. Dla bezpieczeństwa, jeżeli temperatura przetrzymywania przekracza 90°C, zaczyn cementowy powinien zostać ochłodzony do około 90°C przed usuwaniem go z ciśnieniowego wiskozymetru (około 1400 Pa/s).

Zaczyn cementowy powinien być umieszczony w aparacie, w którym stosuje się przerywany ruch obrotowy do pomiaru statycznej wytrzymałości strukturalnej, który został wcześniej podgrzany do temperatury mniejszej od panującej w krążącym zaczynie w strefie cementowania, lub do 90°C. Próbkę powinna być poddana ciśnieniu panującemu w strefie cementowania. Jeżeli panująca tam temperatura jest wyższa od 90°C, szybkość podgrzania do tej temperatury powinna odbywać się z szybkością 2°/minutę. Początkowa SGS i SGS w warunkach panujących w strefie cementowania, powinny być także zanotowane.

Podobnie jak w wiskozymetrach obrotowych oraz ultradźwiękowych czas do osiągnięcia 50, 100, 150, 200 i 250 Pa powinien być zarejestrowany. Rodzaj aparatu stosowanego do pomiaru SGS jak i rodzaj urządzenia, w którym próbka dojrzewała powinny także być zapisane.

6. Interpretacja wyników pomiarów uzyskanych opisanymi trzema metodami

Należy podkreślić, że każda z tych metod daje wyniki różnych rodzajów, gdyż nie porównano zgodności wyników uzyskanych tymi różnymi metodami. Każdy rodzaj badania powinien być więc oceniany indywidualnie, a w przypadku użycia do cementowania różnych zaczynów cementowych, mogą one być porównywane ze sobą, w oparciu o wyniki uzyskane w jednym czasie. W przypadku innego postępowania mogą wynikać pomyłki, ponieważ każda z tych metod rejestruje pojedynczą właściwość reologiczną uzyskaną w danych warunkach pomiarowych, które są unikalne i nie mogą być „przeniesione” na inny rodzaj aparatu.

W związku z tym pomiary wytrzymałości strukturalnej zaczynu zarejestrowane przez jeden z tych trzech rodzajów aparatów nie mogą być przeniesione na inny przy zachowaniu ilościowych i ja-

90°C before slowly removing from the pressurised consistometer (about 1400 Pa/seconds).

The cement slurry should be placed into the intermittent rotation-type static gel strength apparatus preheated to the lesser of the circulating temperature at the zone of interest or 90°C. The sample should be pressurised to the zone of interest. If the temperature there is greater than 90°C, the rate of ramping to the zone of interest should be 2°C/minute). The initial SGS and the SGS value at the zone of interest should be recorded.

As with the rotating-type and ultrasonic-type static gel strength instruments, the same time tests to 50, 100, 150, 200 and 250 Pa should be recorded. The type of apparatus used to make the SGS determination and the type of conditioning instrument should also be recorded.

6. Interpretation of Test Results from the Three Different Test Methods

Please note that each of these tests produces different types of results because likeness is not being compared with these different procedures of experimentation. Each type of test should therefore be judged on an individual basis with different well cement slurries being compared with each other on one test at a time. Otherwise confusion can arise because each of these tests reports an individual rheological property in a fixed experimental environment that is unique and 'not transferable' to the other types of apparatus.

As a consequence, the gel strength measurements recorded by any one of these three types of apparatus are not meaningfully transferable in real qualitative or quantitative terms to the measurements undertaken on the other two types of apparatus. Nevertheless, useful data on cement slurry rheology can be obtained on a comparative basis when only one of these techniques is employed.

7. Underbalanced Conditions Downhole

One method of minimising the period of susceptibility of the well to pressure losses by gel strength development is to minimise the time that an underbalanced condition exists in the wellbore, before the cement has developed sufficient SGS to resist invasion by the well fluids (such as formation fluids and drilling fluids). This is particularly so in deepwater well cementing. Here the fluid overbalance pressure is determined by subtracting the pore pressure at the shallow water flow interval from the annular fluid hydrostatic pressure at the shallow water flow interval. *In deepwater environments with no marine riser in place, the hydrostatic pressure of seawater above the mud-line is included in the annular hydrostatic pressure calculation. The effective diameter of the wellbore equals the diameter of the open hole minus the diameter of the casing or liner.*

In a wellbore environment, the hydrostatic pressure of the fluids in the annulus counteracts the flow potential of a formation as

kościowych wyników oznaczeń. Niemniej jednak pożyteczne dane dotyczące reologii zaczynów cementowych można otrzymać na podstawie porównawczych danych w przypadku, gdy tylko jedna z tych metod jest stosowana.

7. Niezrównoważone warunki w głębi odwiertu

Jedną z metod minimalizowania możliwości występowania w odwiertach strat ciśnienia związanych ze wzrostami wytrzymałości strukturalnej, polega na ograniczeniu czasu, w którym występują niezrównoważone warunki w otworze wiertniczym, zanim cement osiągnie wystarczającą statyczną wytrzymałość strukturalną aby zapobiegać przedostawaniu się cieczy do odwiertu (takich, jak ciecze z utworów skalnych lub cieczy wiertnicze). Zjawisko to występuje szczególnie w przypadku cementowania odwiertów, w których są wody głębokie. W tym przypadku nadmiarowe, kompensujące ciśnienie cieczy oznacza się przez odjęcie przedziału ciśnienia w porach utworu skalnego przy dopływie płytkiej wody od ciśnienia hydrostatycznego cieczy w przestrzeni pierścieniowej. W środowisku głębokiej wody, gdy brak zainstalowanej kolumny rynnowej, ciśnienie hydrostatyczne wody morskiej, powyżej poziomu dna morskiego, jest zawarte w obliczonym ciśnieniu hydrostatycznym w przestrzeni pierścieniowej. Efektywna średnica odwiertu jest równa średnicy otwartego otworu minus średnica orurowania.

W przestrzeni odwiertu, ciśnienie hydrostatyczne cieczy w przestrzeni pierścieniowej przeciwdziała ciśnieniu wypływu z utworów skalnych będącej wynikiem ciśnienia w pustkach tego utworu. W przypadku cieczy, w których zachodzi wiązanie w rodzaju cementowych zaczynów, efektywne ciśnienie hydrostatyczne w przestrzeni pierścieniowej (równoważące ciśnienie w porach utworu skalnego) będzie malało w miarę jak zaczyn cementowy przechodzi przemianę z cieczy do formy żelu, a w końcu w fazę stałą. Zostaje wówczas osiągnięty stan równowagowy. W tym równowagowym stanie, ciśnienie w pustkach utworu skalnego będzie równe sumie innych wytwarzających ciśnienie czynników. Te czynniki ciśnienia składają się z opóźnionego ciśnienia hydrostatycznego wywieranego przez związany cement oraz z pełnego ciśnienia hydrostatycznego kolumny wody morskiej (w środowisku głębokiej wody) oraz z udziału ciśnienia innych cieczy obecnych w przestrzeni pierścieniowej. Ten stan równowagi należy do krytycznego ciśnienia strukturalnego [CSGS] (5).

Gdy strukturalne ciśnienie krytyczne zostaje przekroczone dalsze tężenie cementu będzie powodowało powstawanie stanu mniejszego od zrównoważonego wywołującego przepływ. CSGS jest także znane jako krytyczne przyścienne naprężenie ścinające. Ciśnienie to dla cementu stosowanego w celu zatrzymania przepływu jest funkcją następujących czynników (3,5):

- geometrii odwiertu,
- długości kolumny cementowej nad strefą przepływu,
- gęstości zaczynu cementowego,
- ciśnienia hydrostatycznego cieczy powyżej zaczynu cementowego,

a function of the formation pore pressure. With settable fluids like cements, the effective hydrostatic pressure in the annulus (counteracting the pore pressure of the formation) will decline as the cement slurry changes from a fully hydraulic fluid into a gel state and thence into a solid material. A point of equilibrium will therefore be reached. In this equilibrium the pore pressure of the formation will equal the sum of the other pressure factors present. These pressure factors consist of the delayed hydrostatic pressure exerted by the gelled cement, plus the full hydrostatic pressure of the seawater column (for a deepwater environment), plus any pressure contributions from other fluids present in the annulus. This state of equilibrium comes into the category of critical static gel strength (CSGS) (5).

Once the CSGS is exceeded, any further gellation of the cement will produce an underbalanced condition conducive to flow. CSGS is also known as 'critical wall shear stress' (CSGS). The CSGS for a cement employed in flow mitigation is a function of the following (3, 5):

- Geometry of wellbore
- Length of cement column above flow zone
- Cement slurry density
- Hydrostatic pressure of fluids above cement slurry
- Pore pressure of flow zone.

The aforementioned information is important for seeking to quantify cement thickening (setting) leading to hardening, as would be likely to arise for successful setting of well cementing slurries where the basic chemistry often needs to be better understood (5-7). This is especially important when deepwater cementing is being undertaken (8).

8. Current Status for Standardisation in Well Cementing Rheology

The latest aspects in standardisation for well cementing rheology encompass a technical report type of standard (ISO 10426-6), which summarises the main currently utilised testing procedures for determining static gel strength development. There needs to be more clarity in the determination of static gel strengths, which are of course important phenomena in well cementing. It is clear that rheological data from measurements undertaken using laboratory apparatus tend to be very dependent indeed upon the precise nature of the apparatus and the conditioning given to the cement samples under test. Consequently, it is not surprising that at this moment in time it is not possible to give mandatory test limits in laboratory procedures that can be applied globally and used locally for giving 'pass' or 'fail' criteria for cements being employed downhole for zonal isolation. After all, they are not representative of the complex scenarios encountered downhole during actual well cementing jobs.

– ciśnienia w porach utworu skalnego, w strefie przepływu.

Podane powyżej informacje są ważne dla ustalenia ilościowej charakterystyki tężenia (wiązania) cementu poprzedzającego twardnienie, która powinna być spełniona w celu uzyskania pomyślnego wiązania zaczynów cementowych do cementowania odwiertów, a w ich przypadku podstawowe wiadomości z chemii powinny być często lepiej rozumiane (5-7). Jest to szczególnie ważne gdy proces cementowania odbywa się w wodzie, na dużej głębokości (8).

8. Obecny stan prac normalizacyjnych w zakresie reologii cementowania odwiertów

Ostatnie dane normalizacyjne w zakresie reologii cementowania odwiertów obejmują normę ISO 10426-6 o charakterze raportu technicznego, która omawia główne stosowane obecnie metody badawcze dotyczące oznaczania przyrostu wytrzymałości strukturalnej w warunkach statycznych. Niezbędna jest większa jasność w pomiarach statycznej wytrzymałości strukturalnej, która stanowi ważne zjawisko w cementowaniu odwiertów. Jest oczywiste, że dane reologiczne uzyskane w pomiarach za pomocą urządzeń laboratoryjnych zależą od rodzaju aparatu i warunków, w jakich znajdowały się próbki cementu w trakcie badania. W związku z tym, nie stanowi zaskoczenia, że obecnie nie jest możliwe wyznaczenie obowiązujących granic laboratoryjnych metod postępowania, które mogłyby być powszechnie stosowane w różnych laboratoriach jako kryterium „dobry” lub „nie dobry” w przypadku cementów stosowanych w głębi odwiertów, do izolacji strefowej. Ponadto nie są one reprezentatywne dla złożonych sytuacji, które mogą wystąpić w głębi odwiertów, podczas prac cementowania.

9. Wnioski

Wyniki badań powinny stanowić pożyteczne wskazówki i razem z innymi fizycznymi oraz chemicznymi danymi dawać podstawę do decyzji czy poszczególne zaczyny cementowe są przydatne do cementowania odwiertów. ISO 10426-6¹ (3) jest obecnie pierwszą międzynarodową normą w zakresie cementowania odwiertów, dotyczącą specjalnie reologii, a ma ona formę technicznego raportu. Niestety nie ma na razie dostatecznej liczby dostępnych laboratoriów i aparatury, aby dane pomiarowe mogły dawać podstawę do wyznaczenia obowiązujących granic parametrów reologicznych, obejmujących statyczną wytrzymałość strukturalną zaczynu, lepkość plastyczną i granicę ścinania w przypadku różnych praktycznych i doświadczalnych sytuacji, które mogłyby być powszechnie przyjęte dla cementowania odwiertów. Niemniej jednak takie badania mogą mieć znaczenie w pomiarach laboratoryjnych w celu oceny właściwości poszczególnych cementów wiertniczych, w cementowni i w laboratorium.

Można zakładać, że w przyszłości będą opracowane liczniejsze normy dotyczące właściwości opartych na reologii, obejmujących

¹ Norma EN-ISO 10426 ma już odpowiednik polski: PN-EN ISO 10426 -1, a także -4, -5, -6

9. Conclusions

Such test results that are obtained tend to be useful guidelines, along with other physical and chemical data for judging whether particular cement slurry compositions are appropriate or not in specific downhole well cementations. ISO 10426-6 (3) is the first international standard in well cementing specifically dedicated to rheology, in this instance, and is in the form of a technical report. Unfortunately, there are not yet sufficient available laboratory and equipment data globally for being able to apportion mandatory limits onto rheological parameters like static gel strengths, plastic viscosities and yield strengths for different practical and experimental scenarios that would be globally acceptable in well cementing. Nevertheless, such tests could be of value in laboratory tests for checking the performance of a particular oilwell cement in a given cement plant or laboratory.

It is anticipated that in the future more performance-based rheological standards for well cementing could be developed, as knowledge of important rheological phenomena increases with the passage of time. ISO 10426-6 gives little detailed technical value suitable for field use, but is a useful gathering of information concerning rheology and equipment pertaining thereto for reference purposes. There is no American (ANSI/API) version of this standard, because of some legal problems that have arisen within the USA. Hopefully more meaningful rheological tests will be able to be developed in the future. Such new tests would desirably be able to be employed for critical well modelling, which would be able to facilitate more fully the difficult well cementations that are increasingly being encountered in both the field and in the laboratory.

Acknowledgements

The author wishes to thank Gilson Campos and Cristiana Richard da Miranda of Petrobras-CENPES, Rio de Janeiro, Brazil for useful discussion.

Literatura / References

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 9831:2006 (inc. Errata 1, 24.11.2008). Cimento portland destinado à cimentação de poços petrolíferos – Requisitos e métodos de ensaio. ABNT, Rio de Janeiro (2008).
2. Comité Européen de Normalisation (CEN): EN ISO 10426-1:2009 (inc. Corrigendum No. 1: 2010). Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing – Part 1: Specification. CEN, Brussels (2009).
3. Comité Européen de Normalisation (CEN): EN ISO 10426-6: 2008. Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing – Part 6: Methods for determining the static gel strength of cement formulations. CEN, Brussels (2008).
4. Comité Européen de Normalisation (CEN): EN ISO 10426-2:2003. Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing – Part 2: Testing of well cements. CEN, Brussels (2003).

cementowanie odwiertów, gdyż będzie zwiększać się znajomość zjawisk reologicznych. ISO 10426-6 dostarcza mało szczegółowych danych technicznych, przydatnych dla praktyki lecz jest pożytecznym zbiorem informacji dotyczących reologii i aparatury i może stanowić punkt odniesienia. Nie ma amerykańskiej wersji tej normy co wynika z pewnych problemów prawnych obowiązujących w USA. Można mieć nadzieję, że więcej znaczących badań reologicznych będzie przeprowadzonych w przyszłości. Ich wyniki będą mogły być wykorzystane do opracowania modeli krytycznych odwiertów, które będą wykorzystane do skutecznego ułatwienia trudnych prac cementacyjnych w odwiertach, które są coraz częściej spotykane w praktyce i pociągają za sobą badania laboratoryjne.

5. E. B. Nelson and D. Guillot: 'Well Cementing', 2nd Edition. Schlumberger, Sugar Land, Texas (2006).
6. J. Bensted: Oilwell cements. / Cementy wiertnicze. Cement-Wapno-Beton No. 6, 249-265 (2002).
7. 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).
8. Comité Européen de Normalisation (CEN): EN ISO 10426-3:2004. Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing – Part 3: Testing of deepwater well cement formulations. CEN, Brussels (2004).