

Sławomir Błaż

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Niekonwencjonalny, ultralekki materiał do regulowania gęstości cieczy wiertniczych

Wiercenie otworów w warstwach o obniżonym gradiencie ciśnienia porowego i złożach częściowo szcerpanych wymaga stosowania płuczek o gęstości poniżej 1 g/cm^3 , które pozwolą na bezpieczne odwiercenie otworu i uzyskanie optymalnej wydajności ze złoża. Regulację gęstości płuczek wiertniczych poniżej 1 g/cm^3 umożliwia zastosowanie medium ściśliwego, jakim jest powietrze. Alternatywny sposób regulowania gęstości cieczy wiertniczej to możliwość wykorzystania w składach płuczek wiertniczych nowego rodzaju materiału – szklanych mikrosfer. Szklane mikrosfery, jako materiały o niskiej gęstości, od $0,2 \text{ g/cm}^3$ do $0,6 \text{ g/cm}^3$, mogą być stosowane do zmniejszania gęstości płuczek wodnodispersyjnych, układów emulsyjnych oraz płuczek zasolonych. W artykule przedstawione zostały wstępne wyniki badań laboratoryjnych nad możliwością opracowania składu płuczki o gęstości poniżej 1 g/cm^3 bez udziału fazy gazowej do przewiercania warstw o obniżonym gradiencie ciśnienia złożowego, zawierającej nowy, unikatowy materiał (szklane mikrosfery). Opracowane płuczki zawierające szklane mikrosfery mogą stanowić realną alternatywę do obecnie wykorzystywanych płuczek aeryzowanych lub płuczek z dodatkiem mikrosfer powietrza w zakresie gęstości $0,75 \div 1,0 \text{ g/cm}^3$.

Słowa kluczowe: płuczka wiertnicza, szklane mikrosfery, gęstość, niskie ciśnienie.

Unconventional, ultra-light material to controll the density of drilling fluids

Drilling through layers with reduced pore pressure gradient and partially depleted reservoirs requires the use of drilling muds characterized by a density lower than 1 g/cm^3 . The application of such muds allows for drilling safety and enhances optimal field production rate. Controlling the density of the drilling mud in the range of 0 to 1 g/cm^3 is possible through the use of compressible matter such as air. An alternative way of controlling the density of the drilling fluid is the application of a new kind of material – glass microspheres. This is a material which has a density in the range of 0.2 to 0.6 g/cm^3 and can be used to reduce the density of water based drilling muds, saltwater drilling fluids and emulsions. This article presents the preliminary results of laboratory tests for the possible development of a new low-density drilling mud composition containing a unique new material (glass microspheres). Developed drilling muds containing glass microspheres may be a viable alternative to currently used aerated fluids and muds with gas microspheres in a density range of $0,75 \div 1,0 \text{ g/cm}^3$.

Key words: drilling mud, glass microspheres, density, low pressure.

Wprowadzenie

Gęstość płuczki wiertniczej przy wierceniu otworu jest zwykle utrzymywana pomiędzy gradientem ciśnienia porowego a gradientem ciśnienia szczelinowania. Ciśnienia te są zależne od rodzaju przewierczanych formacji i zmieniają się wraz z głębokością pionową otworu. Tak zmienne warunki występujące podczas wiercenia otworu narzucają konieczność

ciągłej kontroli i regulowania gęstości płuczki wiertniczej. Jeżeli gęstość jest utrzymywana poniżej gradientu ciśnienia porowego, może nastąpić dopływ płynów złożowych do odwiertu, natomiast przy gęstości powyżej gradientu ciśnienia szczelinowania mogą występować częściowe lub całkowite zaniki płuczki w formacje złożowe i uszkodzenie przy tym

przepuszczalności strefy przyotworowej. Regulowanie gęstości cieczy wiertniczych powyżej 1 g/cm^3 na ogół nie stwarza większych problemów i jest możliwe poprzez dodawanie materiałów obciążających o dużej gęstości, takich jak np. węglan wapnia, baryt, hematyt, lub poprzez rozpuszczanie soli.

Wiercenie otworów w warstwach o obniżonym gradiencie ciśnienia porowego i złożach częściowo szcerpanych wymaga stosowania płuczek o gęstości poniżej 1 g/cm^3 , które pozwolą na bezpieczne odwiercenie otworu i uzyskanie optymalnej wydajności ze złoża. Regulowanie gęstości płuczek wiertniczych poniżej 1 g/cm^3 jest możliwe poprzez wykorzystanie medium ściśliwego – powietrza. Wiercenie z użyciem gazu obejmuje szereg rozwiązań o różnym stosunku powietrza i cieczy. W technologii *underbalance* w przeważającej części wiercenie jest przeprowadzane przy zastosowaniu płuczek powietrznych, powietrzno-mgłowych, aeryzowanych lub płuczek pianowych. Pomimo rozwoju wiercenia podciśnieniowego firmy wierzące niechętnie używają tego rodzaju płuczek z powodu trudności z serwisowaniem wielofazowych, ściśliwych cieczy. Technologia wiercenia *underbalance* przy użyciu przedstawionych powyżej płuczek wymaga również zachowania i przestrzegania zwiększonych środków bezpieczeństwa oraz przeprowadzania odpowiednich szkoleń personelu na temat podciśnieniowych procedur wiertniczych. Wysokie koszty aplikacji wymienionych płuczek oraz technologii *underbalance* zmuszają operatorów wierceń do poszukiwania nowych systemów płuczkowych [2, 12, 14].

Alternatywnym sposobem otrzymania niskiej gęstości płuczek wiertniczych jest możliwość zastosowania w ich

składach szklanych mikrosfer o niskiej gęstości. Szklane mikropęcherzyki charakteryzują się bardzo niską gęstością (od $0,12 \text{ g/cm}^3$ do $0,60 \text{ g/cm}^3$) i dużą odpornością na działanie ciśnienia, nawet do 190 MPa. Dzięki swojemu kulistemu kształtowi odznaczają się najmniejszym stosunkiem powierzchni do objętości w porównaniu do innych wykorzystywanych materiałów. Znajdują one szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza w przemyśle lotniczym i samochodowym. Szklane mikropęcherzyki wykonane są ze szkła sodowo-wapniowego lub borokrzemowego i są chemicznie obojętne wobec większości cieczy poza kwasem fluorowodorowym. Szklane mikrosfery mogą być stosowane do zmniejszania gęstości płuczek wodnodispersyjnych, układów emulsyjnych oraz płuczek zasolonych. Należy również zaznaczyć, że jako materiały wielokrotnego użytku mają one znaczną przewagę nad powszechnie wykorzystywanymi materiałami obciążającymi o gęstości powyżej 1 g/cm^3 , ponieważ można je odzyskać z cieczy wiertniczych w procesie flotacji. Dodatkowe potencjalne korzyści wynikające z zastosowania szklanych mikrosfer w składach płuczek wiertniczych to: lepsze właściwości smarne, ograniczenie zaników płuczki w strefach przepuszczalnych oraz zmniejszenie uszkodzenia strefy przyotworowej. Płuczki wiertnicze zawierające szklane mikropęcherzyki umożliwiają wiercenie w zrównoważonych lub w pobliżu zrównoważonych ciśnieniami złożowych i mogą być stosowane zarówno przy wierceniu konwencjonalnym, jak również w technologii wiercenia *underbalance* [1, 2, 13, 15, 16].

Sposoby regulowania gęstości cieczy wiertniczych

Przy doborze płuczek wiertniczych do wiercenia otworu pod uwagę brane są warunki geologiczno-techniczne, a bardzo ważnym czynnikiem jest gradient ciśnienia porowego przewiercanej formacji oraz wartość ciśnienia szczelinowania. Przy wierceniu otworu metodą nadciśnieniową gęstość płuczki wiertniczej należy dobierać w taki sposób, żeby była ona poniżej ciśnienia szczelinowania, a powyżej ciśnienia porowego formacji. Istnieje zatem potrzeba regulowania gęstości płuczek wiertniczych od wartości bliskiej zeru do gęstości nawet powyżej 3 g/cm^3 . Regulowanie gęstości cieczy wiertniczych powyżej 1 g/cm^3 przeważnie nie wiąże się z większymi problemami i jest możliwe dzięki dodaniu do płuczek różnych sproszkowanych materiałów o dużej gęstości, nazywanych materiałami obciążającymi, lub poprzez rozpuszczanie w nich soli.

Jednym z głównych wskaźników jakości materiału obciążającego jest jego gęstość, gdyż od niej uzależniona jest zawartość fazy stałej w płuczce wiertniczej, właściwości

reologiczne płuczki oraz prędkość wiercenia otworu. W zależności od gęstości materiały obciążające można podzielić na trzy grupy [19]:

- 1) materiały o małej gęstości (od $2,6 \text{ kg/m}^3$ do $2,9 \text{ kg/m}^3$), do których należą węglanowe materiały obciążające, takie jak: wapń, kreda, margiel i inne;
- 2) materiały o średniej gęstości (od $3,8 \text{ kg/m}^3$ do $5,0 \text{ kg/m}^3$), do których zaliczane są: baryt, ilmenit, koncentraty rud żelaza o zawartości Fe 45÷55% i inne;
- 3) materiały o dużej gęstości (od $5,0 \text{ kg/m}^3$ do $7,0 \text{ kg/m}^3$), takie jak: koncentraty rud ołowionych, magnetyt i hematyt o zawartości żelaza ponad 70%, rudy żelazowo-arsenowe i inne.

Gęstość cieczy wiertniczych można również zwiększać poprzez rozpuszczanie w nich soli lub mieszanin soli. Sole do obciążania cieczy wiertniczych dzieli się na dwie grupy. Do pierwszej należą sole zawierające jednowartościowe kationy metalu (KCl, NaCl, KBr, NaBr). Największa gęstość

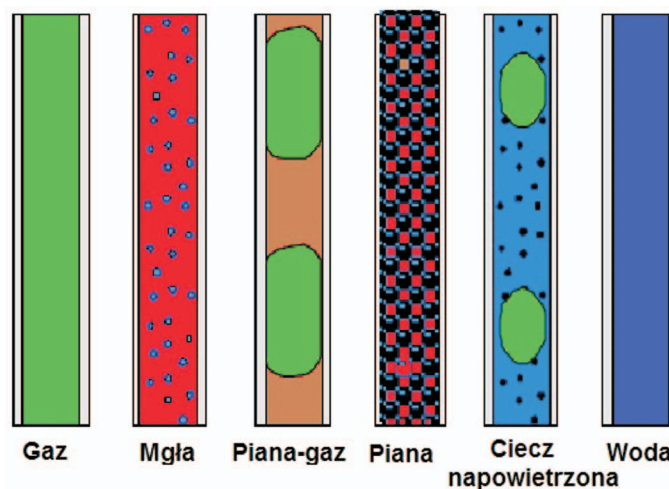
możliwa do uzyskania przy użyciu wymienionych soli lub ich mieszanin wynosi $1,52 \text{ g/cm}^3$. Drugą grupę stanowią sole zawierające dwuwartościowe kationy (CaCl_2 , CaBr_2 , ZnBr_2). Największa gęstość osiągalna w tym przypadku to $2,42 \text{ g/cm}^3$. Natomiast wykorzystując sole organiczne, można uzyskać gęstość płuczki od $1,34 \text{ g/cm}^3$, za pomocą mrówczanu sodu HCOONa , do około $2,37 \text{ g/cm}^3$, z zastosowaniem mrówczanu cezu HCOOCs [10].

Przy wierceniu otworu w warstwach o obniżonym gradientie ciśnienia porowego wymagane jest obniżenie gęstości płuczki bądź nawet zmiana technologii wiercenia, żeby zapobiec uszkodzeniu strefy przyotworowej, np. na wiercenie podciśnieniowe z zastosowaniem płuczek z udziałem fazy gazowej (rysunek 1).

Można wyróżnić następujące rodzaje płuczek z udziałem fazy gazowej [2, 3, 13]:

- Płuczka powietrzna – powietrze jako płuczka może być wykorzystane przy przewiercaniu tzw. suchych formacji bez dopływu solanek złożowych i węglodorów. Przy zastosowaniu tego rodzaju płuczki osiąga się duże prędkości wiercenia.
- Płuczka powietrzno-mgłowa – to rodzaj płuczki, w której ciecz jest rozproszona w fazie gazowej. O systemie płuczek mgłowych możemy mówić, jeżeli udział objętościowy wody nie przekracza 2,5%. Tworzenie systemu mgłowego przeprowadza się poprzez wprowadzenie do fazy gazowej niewielkiej ilości wody z dodatkiem środków powierzchniowo czynnych. Wiercenie za pomocą płuczek mgłowych wymaga zwiększenia wtrysku powietrza o około 30% w stosunku do wymagań przy wierceniu za pomocą powietrza. Większe zapotrzebowanie na powietrze prowadzi do częstszej pracy sprężarek oraz do wzrostu zużycia paliwa, zwiększając dodatkowe koszty całej operacji wiercenia.
- Płuczka pianowa – jest mieszaniną powietrza, wody i środków pianotwórczych (gaz jest rozproszony w cieczy). Płuczki pianowe są najczęściej wytwarzane na powierzchni i zatłaczane do otworu. W zależności od ciśnienia złożowego można regulować gęstość tej płuczki w zakresie $0,2 \div 0,95 \text{ g/cm}^3$. Najczęściej wykorzystywanym gazem w płuczkach pianowych jest powietrze, chociaż mogą być również stosowane inne gazy, takie jak: azot, metan czy dwutlenek węgla. Zawartość i trwałość wytworzonej piany w płuczkach określa się za pomocą stosunku gazu do cieczy.
- Płuczka aeryzowana – napowietrzanie płuczek konwencjonalnych jest rozwiązaniem wykorzystywanym do przewiercania interwałów o niskim gradientie ciśnienia porowego. Stosuje się kombinację wiercenia z użyciem płuczki konwencjonalnej i sprężonego powietrza. W za-

leżności od udziału poszczególnych składników otrzymuje się płuczkę aeryzowaną o różnej gęstości, od $0,7 \text{ g/cm}^3$ do $0,99 \text{ g/cm}^3$. Napowietrzanie płuczki jest praktykowane w przypadku występowania zaników płuczki w otworze.



Rys. 1. Rodzaje przepływu płynów według [13]

Wysokie koszty aplikacji wyżej wymienionych płuczek oraz technologii *underbalance* zmuszają operatorów wiercenia do poszukiwania nowych, alternatywnych systemów płuczkowych [2, 8, 13, 17, 18].

Jednym z rodzajów cieczy o gęstości niższej niż $1,0 \text{ g/cm}^3$ są emulsje olejowo-wodne. Emulsję można zdefiniować jako niejednorodny układ składający się z co najmniej dwóch cieczy, które nie mieszają się ze sobą. Jedna z cieczy jest rozproszona w drugiej, w postaci kropek o wymiarach $0,001 \div 0,005 \text{ mm}$. Najczęściej jedną z faz jest woda, stąd też emulsje można podzielić na dwa podstawowe rodzaje:

- emulsja typu O/W (olej w wodzie);
- emulsja typu W/O (woda w oleju).

Przy sporządzaniu emulsji szczególną uwagę zwraca się na dobór odpowiednich związków syntetycznych – spełniających rolę oleju – ze względu na ich gęstość, co pozwoliłoby na otrzymywanie cieczy wiertniczych o możliwie najniższej gęstości. Jako oleje syntetyczne do sporządzania płuczek olejowych są głównie stosowane:

- estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, które w temperaturze 20°C charakteryzują się gęstością $0,879 \text{ g/cm}^3$;
- mieszaniny liniowych alfa-olefin o długości łańcucha węglowego $\text{C}_{12}\text{--}\text{C}_{14}$, charakteryzujące się gęstością $0,762 \text{ g/cm}^3$.

Przy wykorzystaniu powyższych olejów syntetycznych można uzyskać gęstości płuczek od $0,810 \text{ g/cm}^3$ do $1,0 \text{ g/cm}^3$ [11].

Drugim ze sposobów uzyskania cieczy wiertniczych o obniżonej gęstości (poniżej 1 g/cm^3) jest użycie cieczy

roboczych na bazie organicznych rozpuszczalników lub alkoholi. W Instytucie Nafty i Gazu przeprowadzono badania nad możliwością opracowania cieczy roboczych na bazie izopropanolu, które mogą znaleźć zastosowanie np. podczas prac rekonstrukcyjnych na otworze. Izopropanol jest alkoholem o gęstości $0,785 \text{ g/cm}^3$. Mieszając go z wodą w różnych stosunkach objętościowych, można uzyskać gęstości cieczy roboczych w zakresie $0,785 \div 0,99 \text{ g/cm}^3$.

Gdy gradienty ciśnienia złożowych zawierają się w przedziale $0,008 \div 0,009 \text{ MPa/m}$, do wiercenia otworu można stosować płuczki wiertnicze zawierające specjalnie zaprojektowane mikropęcherzyki powietrza, określane jako afrony, mikropiany lub mikrosfery. Podstawowymi ich cechami są unikatowe właściwości reologiczne, wynikające z obecności odpornych na ciśnienie mikropęcherzyków powietrza, stabilizowanych za pomocą filmu polimerowego z odpowiednio dobranymi surfaktantami. W praktyce afrony są generowane w płuczkach wiertniczych za pomocą konwencjonalnego sprzętu do mieszania poprzez dodanie środków powierzchniowo czynnych. Zawartość afronów w płuczce wiertniczej wynosi na ogół od 12% do 15% obj. powietrza i określana jest poprzez pomiar gęstości cieczy. Zawarte w płuczce mikropęcherzyki powietrza zmniejszają inwazję płuczki i minimalizują uszkodzenie strefy przyodwiertowej. Płuczki charakteryzują się znacznie wyższymi wartościami lepkości przy niskich szybkościach ścinania LSRV niż tradycyjne płuczki oraz obniżoną gęstością. Płuczki zawierające afrony

są odporne na działanie ciśnienia do około 27 MPa, podczas gdy zwykle płuczki pianowe nie wytrzymują ciśnienia rzędu kilku MPa. W strefie zaniku tworzą elastyczne i wystarczająco trwale uszczelnienie porów i szczelin skały, a ich brak przyczepności do skał mineralnych umożliwia łatwe ich wypłukiwanie w czasie produkcji otworu [6, 9].

Alternatywnym sposobem otrzymania niskiej gęstości płuczek wiertniczych – przy uzyskaniu podobnych korzyści jak przy zastosowaniu płuczek gazowych – jest wprowadzenie do konwencjonalnych płuczek wiertniczych szklanych mikrosfer.

Za pomocą szklanych mikrosfer istnieje możliwość obniżenia gęstości cieczy wiertniczych do poziomu, który można uzyskać jedynie przez wprowadzenie do płuczek fazy gazowej. Dodanie szklanych mikrosfer do dowolnej cieczy wiertniczej zmniejsza jej gęstość. Mogą być one dodawane do praktycznie wszystkich rodzajów płuczek wiertniczych. Zmniejszenie gęstości płuczki jest wprost proporcjonalne do stężenia szklanych mikrosfer w płuczce. Płuczki z takim dodatkiem to cieczy jednofazowe, co oznacza, że są praktycznie nieściśliwe. Współczynnik ściśliwości szklanych pęcherzyków w roztworach wodnych jest w zasadzie identyczny jak w przypadku czystej wody. Regulowanie gęstości płuczek wodnodispersyjnych za pomocą szklanych mikrosfer wymaga określenia parametrów reologicznych płuczki, przy których możliwe będzie zawieszenie szklanych mikrosfer w jej strukturze i uzyskanie stabilnej gęstości płuczki [7].

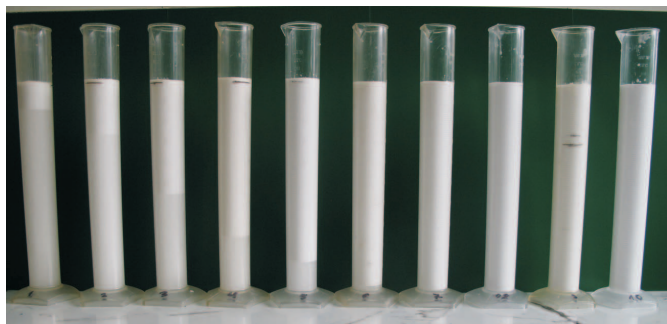
Badania laboratoryjne nad zastosowaniem szklanych mikrosfer w płuczkach wiertniczych

Materiały obciążające o gęstości powyżej 1 g/cm^3 pod wpływem siły ciężkości mają tendencję do sedymentacji. Zjawisko to polega na dynamicznym i statycznym osadzeniu materiału obciążającego na dnie otworu, co powoduje zwiększenie gęstości płuczki w dolnej jego części, a tym samym jej obniżenie w górnej części otworu. W przeciwieństwie do materiałów obciążających, szklane mikrosfery, jako materiały o gęstości niższej od wody (od $0,2 \text{ g/cm}^3$ do $0,6 \text{ g/cm}^3$), nie ulegają sedymentacji, lecz wypływają na powierzchnię cieczy. Pomimo różnicy w zachowaniu się materiałów do regulowania gęstości cieczy wiertniczych płuczka zawierająca szklane mikrosfery powinna charakteryzować się stabilną gęstością. Niestabilny profil gęstości w systemie obiegowym może prowadzić do poważnych problemów związanych z zatrzymaniem obiegu, niestabilnością otworu lub przechwyceniem przewodu.

Przy opracowaniu nowego rodzaju płuczki wiertniczej o gęstości poniżej 1 g/cm^3 badania rozpoczęto od doboru odpowiednich polimerów strukturotwórczych, umożliwiających uzyskanie parametrów reologicznych zapewniających

zawieszenie szklanych mikrosfer w strukturze płuczki wiertniczej. Wstępne badania laboratoryjne prowadzono z wykorzystaniem biopolimeru XCD, który posiada właściwości strukturotwórcze. W związku z tym sporządzono wodne roztwory XCD o stężeniu od 0,1% do 0,4%, określono ich parametry reologiczne, następnie do każdej próbki wprowadzano szklane mikropęcherzyki w ilości od 5% do 50% obj., poddając je mieszanemu przez okres około 30 min. Po ujednorodnieniu próbek określono ich parametry reologiczne i gęstość, a następnie przelewano do cylindrów miarowych o poj. 100 cm^3 i pozostawiano na okres 48 godz. (fotografia 1). Po upływie założonego czasu pobierano próbki z górnej i dolnej części cylindra miarowego celem zbadania ich gęstości. Na podstawie przeprowadzonych badań określono parametry reologiczne dla poszczególnych dodatków mikrosfer, przy których próbki charakteryzowały się taką samą gęstością w całej objętości.

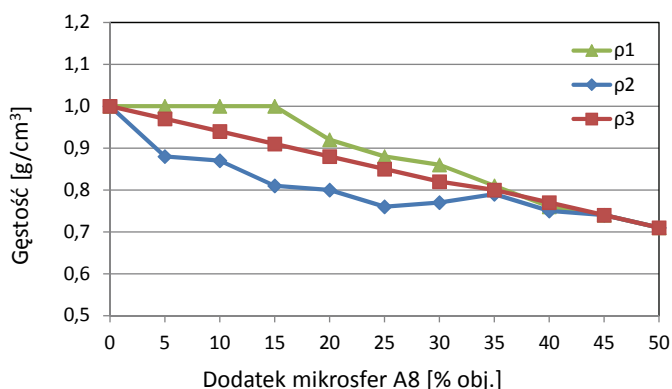
Wymagania odnośnie do regulacji parametrów reologicznych są tym większe, im większa jest różnica gęstości pomiędzy cieczą wyjściową a zastosowanymi mikrosfere-



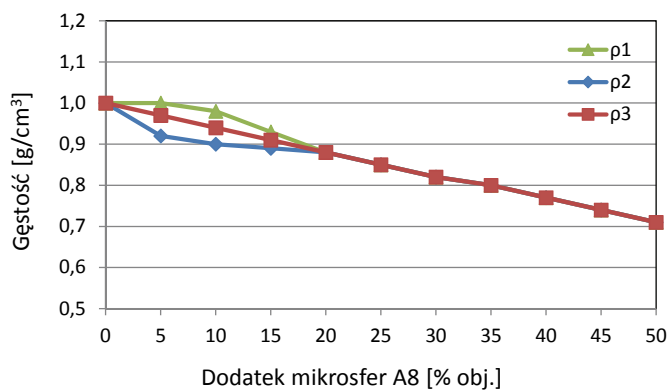
Fot. 1. Dodatek szklanych mikrosfer A8 do 0,1-proc. roztworu XCD

mi. Płuczka powinna się zatem charakteryzować niewielką lepkością przy wysokich prędkościach ścinania, natomiast w celu ograniczenia rozdziału szklanych mikrosfer – wysokimi wartościami lepkości i granicy płynięcia przy niskich szybkościach ścinania. Dotyczy to również okresów, kiedy płuczka nie krąży i materiały do zmniejszania gęstości i zwierziny muszą być zawieszane w strukturze płuczki. Do badań laboratoryjnych zastosowano szklane mikrosfery o gęstościach od $0,2 \text{ g/cm}^3$ do $0,6 \text{ g/cm}^3$ (tablica 1).

W tablicy 2 i na rysunkach 2–5 zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych dodania szklanych mikrosfer A8



Rys. 2. Wpływ dodatku szklanych mikrosfer A8 na gęstość wodnego 0,1-proc. roztworu XCD

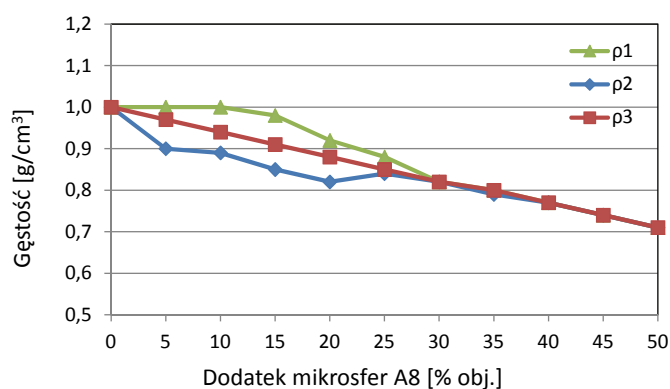


Rys. 4. Wpływ dodatku szklanych mikrosfer A8 na gęstość wodnego 0,25-proc. roztworu XCD

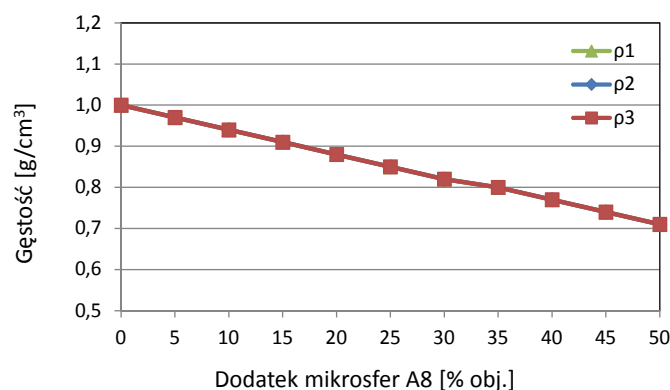
Tablica 1. Rodzaje szklanych mikrosfer zastosowanych w badaniach

Rodzaj szklanych mikrosfer	Gęstość mikrosfer $[\text{g/cm}^3]$	Wytrzymałość na działanie ciśnienia $[\text{MPa}]$
A20	0,20	3,5
A5	0,38	37,9
A8	0,42	55,2
A10	0,60	68,9
A16	0,46	114,0

o gęstości $0,42 \text{ g/cm}^3$ na parametry reologiczno-strukturalne i gęstość roztworu biopolimeru XCD. Na rysunkach 2–5 przedstawiono też, przy jakiej zawartości A8 możliwe jest uzyskanie takiej samej gęstości w całej objętości próbki. Krzywa ρ_1 reprezentuje gęstość roztworu wyznaczoną z próbki pobranej z górnej części cylindra miarowego po okresie 48 godz., krzywa ρ_2 obrazuje gęstość próbki roztworu pobranej z dolnej części cylindra po tym samym czasie, natomiast krzywa ρ_3 przedstawia teoretyczną gęstość roztworu. Na podstawie wyników tych badań zauważono, że parametry reologiczno-strukturalne wymagane do zawieszenia szkla-



Rys. 3. Wpływ dodatku szklanych mikrosfer A8 na gęstość wodnego 0,2-proc. roztworu XCD



Rys. 5. Wpływ dodatku szklanych mikrosfer A8 na gęstość wodnego 0,3-proc. roztworu XCD

Tablica 2. Wpływ dodatku szklanych mikrosfer A8 o gęstości 0,42 g/cm³ na parametry wodnych roztworów biopolimeru XCD

Nr próbki	Skład roztworu [% obj.]		Gęstość [kg/m ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymał. struktural. [Pa]	Lepkość LSRV przy 0,06 s ⁻¹ [mPa·s]	Granica płynięcia LSYP [Pa]
			ρ ± 5	η_{pl} ± 1	η_s ± 0,25	τ_y ± 0,75	I/II ± 0,05	LSRV ± 10	LSYP ± 0,05
1	0,1% XCD	100	1000	3,0	4,0	0,96	0,14/0,24	1500	0,10
2	0,1% XCD A8	95 5	970	3,0	4,5	1,40	0,14/0,24	1550	0,10
3	0,1% XCD A8	90 10	940	4,0	5,5	1,40	0,14/0,24	1600	0,14
4	0,1% XCD A8	85 15	910	5,0	6,5	1,90	0,24/0,33	1670	0,20
5	0,1% XCD A8	80 20	880	6,0	8,5	2,40	0,33/0,57	1800	0,24
6	0,1% XCD A8	75 25	850	8,0	10,5	2,40	0,48/0,72	1820	0,29
7	0,1% XCD A8	70 30	820	11,0	14,5	3,30	0,57/0,86	1900	0,33
8	0,1% XCD A8	65 35	800	14,5	19,0	4,30	0,62/0,96	2000	0,48
9	0,1% XCD A8	60 40	770	24,0	28,0	3,80	0,72/1,2	3500	0,67
10	0,1% XCD A8	55 45	740	37,0	42,0	4,80	0,96/1,9	6200	1,34
11	0,1% XCD A8	50 50	710	55,0	65,0	9,60	1,4/2,4	7000	1,34
12	0,2% XCD	100	1000	4,0	7,0	2,90	0,96/1,4	3600	0,48
13	0,2% XCD A8	95 5	970	5,0	8,0	2,90	0,96/1,4	4200	0,86
14	0,2% XCD A8	90 10	940	5,0	9,0	3,80	0,96/1,9	4500	0,96
15	0,2% XCD A8	85 15	910	6,0	10,5	4,30	0,96/2,3	4700	1,05
16	0,2% XCD A8	80 20	880	8,0	13,0	4,80	1,4/2,6	5700	1,15
17	0,2% XCD A8	75 25	850	9,0	14,5	5,30	1,4/2,9	5900	0,24
18	0,2% XCD A8	70 30	820	11,0	18,0	6,70	1,9/2,9	6300	1,30
19	0,25% XCD	100	1000	3,0	8,5	5,30	1,4/1,9	4800	1,20
20	0,25% XCD A8	95 5	970	3,0	9,0	5,70	1,7/2,4	5100	1,24
21	0,25% XCD A8	90 10	940	5,0	10,5	5,30	1,9/2,6	5300	1,34
22	0,25% XCD A8	85 15	910	6,0	11,5	5,30	1,9/2,9	5500	1,43
23	0,25% XCD A8	80 20	880	7,0	13,5	6,20	1,9/3,3	7100	1,48

* Wyniki pomiarów oszacowano na podstawie klasy dokładności przyrządów pomiarowych.

nych mikrosfer w cieczach wiertniczych są zależne od ich stężenia. Wraz ze wzrostem dodatku mikrosfer wymagane są znacznie mniejsze lepkości roztworów, przy których następuje ustabilizowanie gęstości w całej objętości próbki.

Parametry reologiczno-strukturalne 0,1-proc. roztworu biopolimeru XCD (rysunek 2) są odpowiednie do zawieszenia w jego strukturze od 45% do 50% obj. szklanych mikrosfer A8 o gęstości $0,42 \text{ g/cm}^3$. W wyniku dodania 50% obj. A8 możemy obniżyć gęstość cieczy wiertniczej z 1000 kg/m^3 do 710 kg/m^3 , czemu towarzyszy zwiększenie lepkości plastycznej roztworu z wartości $3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ do $55 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ oraz lepkości LSRV z $1500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ do powyżej $7000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (tablica 2, rysunek 2). Pomiar gęstości próbki pobranej z górnej i dolnej części cylindra pomiarowego wykazały, że przy dodatku 30% obj. A8 do 0,2-proc. roztworu XCD możliwe jest uzyskanie stabilnej gęstości próbki (rysunek 3). Parametry

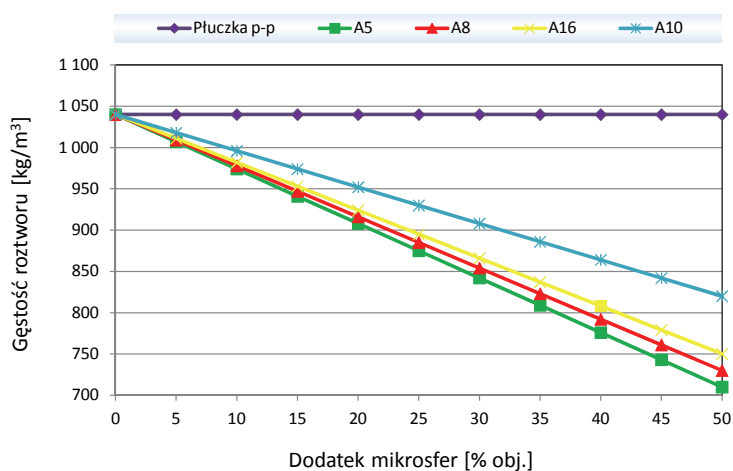
reologiczne, przy których następuje zawieszenie mikrosfer, to: granica płynięcia płuczki przy wysokich prędkościach ścinania równa $6,7 \text{ Pa}$ i lepkość LSRV wynosząca powyżej $6300 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (tablica 2). Obniżenie gęstości płuczki w zakresie $880 \div 820 \text{ kg/m}^3$ wymaga wprowadzenia do roztworu od 20% do 30% obj. A8. Taka ilość dodanych mikrosfer powoduje konieczność zwiększenia granicy płynięcia roztworu do co najmniej $5,3 \text{ Pa}$ i LSYP powyżej $1,2 \text{ Pa}$ (tablica 2, rysunek 4). Natomiast dodanie szklanych mikrosfer poniżej 20% obj. wymaga zwiększenia lepkości. Regulacja gęstości płuczki w zakresie $880 \div 1000 \text{ kg/m}^3$ za pomocą mikrosfer A8 wiąże się z koniecznością zwiększenia parametrów reologicznych roztworu wyjściowego (lepkości LSRV do około $9000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ i granicy płynięcia LSYP powyżej $1,9 \text{ Pa}$) – przy takich parametrach reologiczno-strukturalnych możliwe jest utrzymanie stabilnej gęstości roztworu (rysunek 5).

Badania laboratoryjne wpływu dodatku szklanych mikrosfer na właściwości płuczek wiertniczych

Szklane mikrosfery mogą być dodawane do praktycznie wszystkich rodzajów płuczek wiertniczych w celu zmniejszenia ich gęstości. Nie ma w zasadzie ograniczeń w ilości dodawanych szklanych mikrosfer. W większości przypadków takie ograniczenia są wyznaczane tylko poprzez nadmierny wzrost parametrów reologicznych i filtracji płuczek wiertniczych. Jako ogólną zasadę można przyjąć, iż maksymalny dodatek szklanych mikrosfer do płuczek to około 50% obj. Powyżej tego poziomu następuje gwałtowny wzrost parametrów reologicznych do wartości niemierzalnych. Na podstawie wstępnych badań ustalono skład płuczki potasowo-polimerowej, do której wprowadzono szklane mikrosfery w ilości od 5% do 50% obj. (rysunek 6). Analizując wpływ rodzaju mikrosfer na właściwości ww. płuczki, można zauważyć różnicę w obniżaniu jej gęstości przy takim samym dodatku poszczególnych rodzajów mikrosfer. Obniżenie gęstości płuczki jest wprost proporcjonalne do ich stężenia w płuczce. Za pomocą szklanych mikrosfer A5 przy maksymalnym dodatku 50% obj. można obniżyć gęstość płuczki do 710 kg/m^3 . Przy zastosowaniu takiego samego dodatku A8 gęstość płuczki zmniejszy się do 730 kg/m^3 . Szklane mikrosfery A16, o gęstości $0,46 \text{ g/cm}^3$, pozwolą na uzyskanie gęstości płuczki 750 kg/m^3 , natomiast dodanie szklanych mikrosfer A10 obniży gęstość płuczki do 840 kg/m^3 .

Odporność na działanie ciśnienia poszczególnych rodzajów mikrosfer uzależniona jest od ich gęstości. Szklane mikrosfery o mniejszej odporności na działanie ciśnienia, np. A5, są w stanie w większym stopniu obniżyć gęstość płuczki przy takim samym ich dodatku niż szklane mikros-

fery o większej odporności, np. A10. Dlatego przy wyborze danego rodzaju mikrosfer należy brać pod uwagę gęstość materiału i jego odporność na działanie ciśnienia.



Rys. 6. Wpływ rodzaju i stężenia szklanych mikrosfer na zmiany gęstości płuczki potasowo-polimerowej

Na podstawie badań wpływu poszczególnych rodzajów mikrosfer na właściwości płuczki potasowo-polimerowej, które dotyczyły głównie możliwości obniżenia gęstości płuczki oraz odporności szklanych mikrosfer na działanie ciśnienia, do dalszych badań wybrano mikrosfery A8 o gęstości $0,42 \text{ g/cm}^3$ i odporności na działanie ciśnienia do około $55,2 \text{ MPa}$. Wybrany rodzaj szklanych mikrosfer zastosowano do obniżenia gęstości płuczki glikolowo-potasowej. W składzie tej płuczki jako inhibitory hydratacji skał ilasto-lupkowych zastosowano KCl i glikol. Do regulowania parametrów reologiczno-strukturalnych w warunkach podwyższonej temperatury użyto biopolimeru. Wpływ dodatku wybranego rodzaju szklanych mikrosfer (A8)

Tablica 3. Wpływ dodatku szklanych mikrosfer A8 o gęstości 0,42 g/cm³ na parametry płuczki glikolowo-potasowej

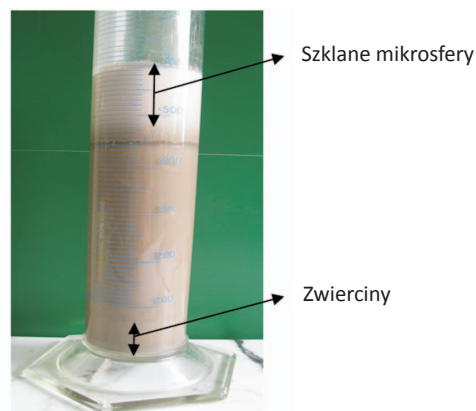
Nr płuczki	Skład roztworu [% obj.]		Gęstość [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymał. struktural. [Pa]	Filtracja [cm ³]	Lepkość LSRV przy 0,06 s ⁻¹ [mPa · s]	Granica płynięcia LSYP [Pa]	pH
			ρ ± 5	η_{pl} ± 1	η_s ± 0,25	τ_y ± 0,75	I/II ± 0,25	± 0,2	LSRV ± 10	LSYP ± 0,05	± 0,05
1	Płuczka glikolowo-potasowa		1 040	11	20,5	9,1	3,3/4,3	4,0	20 000	2,4	9,6
2	Płuczka nr 1 + A8	95 5	1 010	13	24,0	10,5	3,8/4,8	2,8	18 000	3,3	9,6
3	Płuczka nr 1 + A8	90 10	980	13	26,0	12,4	4,3/5,3	3,0	19 000	3,4	9,6
4	Płuczka nr 1 + A8	85 15	950	15	28,5	12,9	4,8/5,7	3,6	23 000	4,3	9,6
5	Płuczka nr 1 + A8	80 20	920	16	34,0	17,2	5,7/7,6	4,4	24 000	5,3	9,6
6	Płuczka nr 1 + A8	75 25	890	22	42,5	19,6	8,6/10,5	6,0	36 000	7,2	9,6
7	Płuczka nr 1 + A8	70 30	850	32	58,5	25,3	11/13,4	8,4	39 000	10,0	9,7
8	Płuczka nr 1 + A8	65 35	820	49	86,5	35,8	17,7/21,5	16,0	74 000	15,3	9,7
9	Płuczka nr 1 + A8	60 40	800	57	110,5	51,1	19,1/23,4	18,4	83 000	16,2	9,7

* Wyniki pomiarów oszacowano na podstawie klasy dokładności przyrządów pomiarowych.

na właściwości płuczki glikolowo-potasowej przedstawiono w tablicy 3. Obniżanie gęstości płuczki przeprowadzono poprzez dodanie A8 w ilości od 5% do 40% obj. Gęstość wyjściowa ww. płuczki wynosiła 1040 kg/m³, a dodatek 5% obj. szklanych mikrosfer A8 wpłynął na jej obniżenie do wartości 1010 kg/m³. W wyniku dodania A8 wzrosła lepkość plastyczna płuczki, z 11 mPa · s do 13 mPa · s, oraz obniżeniu uległa jej filtracja: z 4 cm³/30 min do 2,8 cm³/30 min. Kolejne dodatki szklanych mikrosfer wpływają na efektywne obniżenie gęstości płuczki. Przy dodatku 40% obj. A8 możliwe jest osiągnięcie wartości około 800 kg/m³. Wraz z obniżaniem gęstości płuczki poprzez wprowadzanie coraz większych dodatków szklanych mikrosfer wzrasta w niej ilość fazy stałej, która wpływa bezpośrednio na wzrost parametrów reologiczno-strukturalnych. Zbyt duża zawartość lekkiej fazy stałej w płuczce powoduje także tworzenie grubych osadów filtracyjnych i zwiększenie filtracji płuczki. Dlatego też przy obniżaniu gęstości płuczek za pomocą dodania szklanych mikrosfer należy kontrolować parametry reologiczno-strukturalne płuczki, bowiem zbyt duże wartości jej lepkości mogą powodować wzrost oporów przepływu, co może doprowadzić do zagrożenia związanego z rozszczelnieniem przewierczonych warstw.

Podczas wiercenia otworu do płuczek wiertniczych dostaje się zwiercona faza stała – zwierciny, które na powierzchni

są oddzielane od płuczek na sitach wibracyjnych, hydrocyklonach i wirówkach. W przypadku płuczek zawierających szklane mikrosfery podczas oczyszczania płuczki ze zwiercin należy zwracać szczególną uwagę na zastosowanie odpowiednich rodzajów sit wibracyjnych oraz utrzymywanie odpowiednich parametrów przepływu płuczki przy oczyszczaniu na hydrocyklonach i wirówkach, by nie oddzielać od płuczki wraz z fazą stałą szklanych mikrosfer.



Fot. 2. Sposób rozdzielania szklanych mikrosfer od płuczki

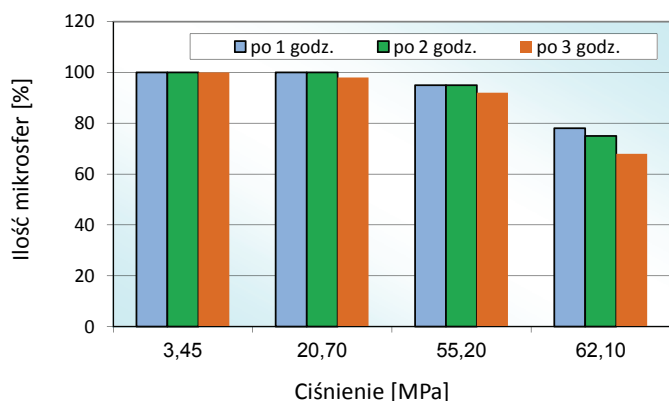
Na fotografii 2 przedstawiono sposób rozdzielania fazy stałej zawartej w płuczce. Il mioczeński, imitujący zwierciny, pod wpływem siły ciężkości sedymentuje na dno cylindra mia-

rowego, natomiast szklane mikrosfery, jako materiał lżejszy od wody, wypływają na powierzchnię. Rozcieńczenie płuczki do określonych parametrów reologicznych, zależnych od jej

składu, jest jednym ze sposobów umożliwiających oddzielenie szklanych mikrosfer z płuczki w celu ponownego ich wykorzystania.

Badania odporności płuczki zawierającej szklane mikrosfery na działanie podwyższonego ciśnienia

Jednym z najważniejszych czynników, które należy rozważyć przy wyborze rodzaju szklanych mikrosfer do obniżania gęstości płuczek wiertniczych, jest ich gęstość oraz mechaniczna wytrzymałość i odporność na działanie ciśnienia i temperatury. Niektóre rodzaje mikrosfer są odporne na działanie ciśnień nawet powyżej 124 MPa, co czyni je idealnymi do zastosowania w bardzo głębokich otworach. Poniżej przedstawiono badania odporności szklanych mikrosfer A8 w środowisku płuczki glikolowo-potasowej na działanie zmiennych ciśnień.

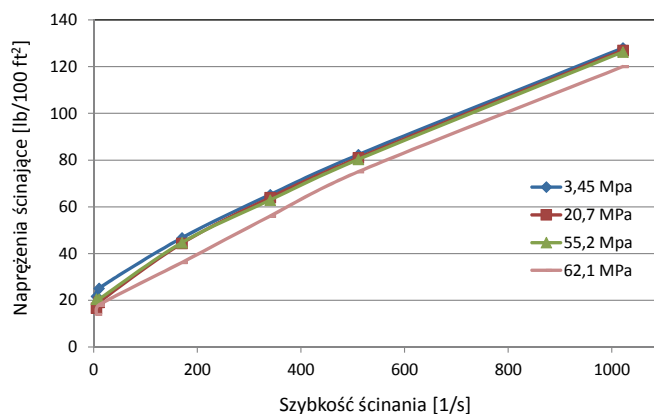


Rys. 7. Wpływ działania ciśnienia na zawartość szklanych mikrosfer A8 w środowisku płuczki glikolowo-potasowej

Badania odporności mikrosfer na działanie ciśnienia przeprowadzono za pomocą wiskozymetru Ofite 77. Do tego celu wytypowano płuczkę zawierającą około 40% obj. szklanych mikrosfer A8. Przed wykonaniem badania ustalono gęstość płuczki na 800 kg/m^3 , następnie umieszczono ją w komorze wiskozymetru i przeprowadzono analizę parametrów reologiczno-strukturalnych w temp. 20°C przy różnych ciśnieniach (rysunek 7). Szklane mikrosfery A8 w środowisku płuczki glikolowo-potasowej poddano działaniu ciśnienia 3,45 MPa, 20,74 MPa, 55,2 MPa i 62,1 MPa przez okres 1 godz., 2 godz. i 3 godz. Badania płuczki przy ciśnieniu 3,45 MPa wykazały,

że szklane mikrosfery nie ulegają zniszczeniu. Gęstość płuczki zmierzona po wyznaczonych czasach 1 godz., 2 godz. i 3 godz. nie zmieniła się i wynosiła 800 kg/m^3 . Badania płuczki przy ciśnieniu 20,7 MPa także wskazują na dobrą odporność A8 w rozważanym zakresie ciśnień. Przy ciśnieniu 55,2 MPa ilość szklanych mikrosfer w płuczce uległa zmniejszeniu o około 5% po 2 godz. oddziaływania ciśnienia i o około 8% po 3 godz. Największa ilość mikrosfer uległa zniszczeniu przy działaniu ciśnienia około 62,1 MPa – po czasie 3 godz. zostało zniszczonych około 32% z nich. W wyniku działania ciśnienia następuje pękanie mikrosfer, co wpływa tym samym na zwiększenie gęstości płuczki. Po zmianach parametrów reologiczno-strukturalnych można również zauważyć zmniejszenie ilości szklanych mikrosfer wraz ze wzrostem ciśnienia do 62,1 MPa. Krzywe płynięcia przedstawione na rysunku 8 pokazują, że wraz ze wzrostem ciśnienia następuje niewielkie obniżenie parametrów reologicznych płuczki, co również może świadczyć o zmniejszeniu w niej ilości mikrosfer na skutek działania ciśnienia.

Przeprowadzone badania wskazują, że szklane mikrosfery A8 można bezpiecznie stosować do ciśnienia około 55 MPa.



Rys. 8. Krzywe płynięcia płuczki glikolowo-potasowej zawierającej 40% obj. szklanych mikrosfer A8 przy różnym ciśnieniu

Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne nad możliwością zastosowania szklanych mikrosfer w płuczках wiertniczych wykazały, że ten nowy rodzaj materiału z uwagi na swoje właściwości może być używany do regulowania gęstości cieczy wiertniczych poniżej 1 g/cm^3 .

Przed obniżaniem gęstości płuczek za pomocą szklanych mikrosfer zaleca się wykonanie badań w celu określenia parametrów reologicznych płuczki, przy których możliwe będzie zawieszenie danego rodzaju szklanych mikrosfer w jej strukturze i uzyskanie płuczki wiertniczej o stabilnej gęstości.

Zmniejszenie gęstości płuczki osiągnięte za pomocą szklanych mikrosfer jest wprost proporcjonalne do ich stężenia w płuczce. Dzięki zastosowaniu tego materiału można zmniejszyć gęstości płuczek wiertniczych do wartości osiągalnych jedynie poprzez wprowadzenie do nich fazy gazowej. Za pomocą dodatku szklanych mikrosfer do płuczek wiertniczych możliwe jest obniżenie gęstości cieczy wiertniczych z 1000 kg/m^3 do:

- 600 kg/m^3 – przy zastosowaniu szklanych mikrosfer A20;
- 690 kg/m^3 – przy zastosowaniu szklanych mikrosfer A5;
- 710 kg/m^3 – przy zastosowaniu szklanych mikrosfer A8;
- 730 kg/m^3 – przy zastosowaniu szklanych mikrosfer A16;
- 800 kg/m^3 – przy zastosowaniu szklanych mikrosfer A10.

Na podstawie badań laboratoryjnych wpływu poszczególnych rodzajów mikrosfer na właściwości płuczek – głównie na możliwość obniżenia ich gęstości – oraz biorąc pod uwa-

gę odporność szklanych mikrosfer na działanie ciśnienia, ustalono, że do obniżania gęstości płuczek wodnodispersyjnych najbardziej odpowiednie są mikrosfery A8, o gęstości $0,42 \text{ g/cm}^3$ i odporności na działanie ciśnienia do około 55 MPa .

Dodatek szklanych mikrosfer A8 do płuczek może wynosić maksymalnie do 40% obj. – płuczki z większą zawartością A8 cechują się wysokimi parametrami reologiczno-strukturalnymi i wysoką filtracją. Za optymalny uznano dodatek do 20% obj. mikrosfer.

Przeprowadzone badania odporności szklanych mikrosfer w środowisku płuczek wiertniczych na działanie podwyższonego ciśnienia i temperatury wykazały, że wybrany rodzaj mikrosfer A8 można bezpiecznie stosować do wiercenia otworów, w których występują temperatury do 120°C i ciśnienia do 55 MPa .

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 4, s. 219–228

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Niekonwencjonalny, ultralekki materiał do regulowania gęstości cieczy wiertniczych* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-41000-71/13, nr zlecenia 0071/KW/13.

Literatura

- [1] Arco M. J., Blanco J. G., Marquez R. L., Garavito S. M., Torvar J. G., Farias A. F., Capo J. A.: *Field application of glass bubbles as a density-reducing agent*. SPE 62899, 2000.
- [2] Badrul M., Rae R., Ishenny Noor M., An N. Suhadi, Melvin Devadaas: *Increasing Production by Maximizing Underbalance During Perforation Using Nontraditional Lightweight Completion Fluid*. SPE Drilling & Completion 2009.
- [3] Bielewicz D.: *Płyny wiertnicze*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
- [4] Blanco J. G., Mata R. F., Ojeda A.: *Field application of Glass Bubbles as a Density reducing agent in an oil base drilling fluid for marginal/low-permeability/low-pressure reservoirs*. SPE 75508, 2002.
- [5] Blaz S.: *Dobór właściwości płuczek wiertniczych do wiercenia otworów w złożach gazu niekonwencjonalnego*. Dokumentacja INiG, 2012.
- [6] Blaz S.: *Nowy rodzaj płuczki zawierającej mikrosfery powietrza do przewiercania warstw o niskim ciśnieniu złożowym*. Nafta-Gaz 2012, nr 1, s. 32–40.
- [7] Chen G., Burnett D.: *Improving performance of low density drill in fluids with hollow glass spheres*. SPE 82276, 2003.
- [8] Cohen J. H., Deskins G.: *Use of lightweight solid additives to reduce the weight of drilling fluid in the riser*. IADC/SPE 99174, 2006.
- [9] Growcock F., Belkin A., Irving M., O'Connor B.: *Recent advances in aphron drilling-fluid technology*. SPE Drilling & Completion 2007, June.
- [10] Herman Z., Uliasz M.: *Ciecze robocze w rekonstrukcjach odwiertów*. Nafta-Gaz 2006, nr 11, s. 584–593.
- [11] Jasinski B.: *Badania nad zastosowaniem emulsji olejowo-wodnych jako cieczy roboczych o obniżonej gęstości*. Nafta-Gaz 2012, nr 12, s. 1155–1164.
- [12] Mata C.: *Reduced Density Fluids with 3M™ Glass Bubbles*. Advanced Materials Division 3M™, 2013.
- [13] Maurer W. C., McDonald W. J., Williams T. E., Cohen J. H.: *Development and testing of underbalanced drilling products*. Final Report, July 2001.
- [14] Munawar K., Badrul M. J., Abdul Aziz Abdul Raman: *Flow properties of super light weight completion fluid for perforation cleanup during underbalance condition*. SPE/IADC 130327, 2010.
- [15] Munawar K., Badrul M. J., Abdul Aziz Abdul Raman: *Rheological and statistical evaluation of nontraditional lightweight completion fluid and its dependence on temperature*. Journal of Petroleum Science and Engineering 2011, April, pp. 27–33.
- [16] Munawar K., Badrul M. J., Abdul Aziz Abdul Raman: *Application of natural clay to formulate nontraditional completion fluid that triples oil productivity*. World Academy of Science, Engineering and Technology 2010, vol. 41, pp. 532–537.
- [17] Ovcharenko A. V., Devadass M.: *Assessment on the performance of hollow glass microspheres in low density fluids for workover programs in fractured basement reservoir at the White Tiger Oil Fields, Cuu Long Basin, Vietnam*. SPE/IADC 130326, 2010.
- [18] Pratama E., Rachman, S. G., Martin Y., Purwanto A.: *Lightweight water-based mud using glass bubbles for drilling a 6" horizontal section in a Gunung Kembang development well*. SPE 132251, 2010.
- [19] Raczkowski J., Polchlopek T.: *Materiały i środki chemiczne do sporządzania płuczek wiertniczych*. Prace IGNiG Nr 95, 1998, Kraków.
- [20] Thyagaraju B. A., Krishna Pratap K., Pangtey K. S., Trivedi Y. N., Garg S., Georges G. P., Goff D. A., Gilles P., Devadass M.: *Case study using hollow glass microspheres to reduce the density of drilling fluids in the Mumbai High, India and subsequent field trial at GTI Catoosa test facility*. SPE/IADC 125702, 2009.



Mgr inż. Sławomir BŁAŻ
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Technologii Wiercenia.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: slawomir.blaz@inig.p