

Badania nad doborem materiałów blokujących do tymczasowego uszczelnienia ściany otworu

Research on the selection of bridging agents for the temporary sealing of the borehole wall

Bartłomiej Jasiński, Małgorzata Uliasz, Paweł Budak, Marcin Majkrzak, Łukasz Kłyż

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Skąły zbiornikowe charakteryzują się systemem szczelin i porów, w których nagromadzone są węglowodory, a zwykle także woda złożowa. Proces dowiercania wymaga zastosowania cieczy, które mogą zapewnić odpowiedni stopień uszczelnienia przestrzeni porowej skały strefy przyodwiertowej, a jednocześnie nie grożą trwałym uszkodzeniem przepuszczalności formacji. Przedostanie się nadmiernej ilości fazy stałej lub filtratu płuczki do skały złożowej może doprowadzić do trwałego uszkodzenia przepuszczalności, co skutkuje ograniczeniem lub całkowitym brakiem możliwości eksploatacji złoża węglowodorów. Cząstki stałe o wymiarach mniejszych od średnic porów skały wnikają w głąb i blokują kanały porowe, zmniejszając przepuszczalność tym skuteczniej, im są bardziej miękkie i elastyczne. Z kolei wnikający filtrat powoduje wystąpienie wielu zjawisk fizycznych i chemicznych w skałe zbiornikowej, przy czym decydującą rolę odgrywają pęcznienie i dyspersja minerałów ilastych wchodzących w skład skały zbiornikowej oraz zjawiska adhezyjno-kapilarne. Niniejszy artykuł prezentuje wyniki badań przeprowadzonych w celu opracowania składów cieczy charakteryzujących się jak najlepszą zdolnością do wytwarzania ścisłego osadu uszczelniającego na ścianie otworu, który jednocześnie w jak najwyższym stopniu ograniczy uszkodzenie strefy przyodwiertowej poprzez minimalizację zjawiska wnikania do niej filtratu oraz cząsteczek fazy stałej zawartej w cieczach wiertniczych. W charakterze środków mostkujących, oprócz tradycyjnych blokatorów węglanowych, zastosowane zostały nowoczesne środki takie jak mielony hausmanit (tetratlenek trimanganu). Przeprowadzono badania nad doborem składu płuczki wiertniczej, której parametry reologiczne zapewnią zawieszenie fazy stałej w postaci różnych rodzajów blokatorów. Po opracowaniu płuczki bazowej jej skład modyfikowano poprzez dodatek różnych konfiguracji blokatorów. Zestawy blokatorów dodawanych do płuczki były zróżnicowane zarówno pod względem budowy chemicznej, jak i rozmiaru cząstek. Tak zmodyfikowane płuczki poddano badaniom właściwości technologicznych, takich jak: parametry reologiczne, filtracja API, pH. W kolejnym etapie przeprowadzono badania laboratoryjne uszkodzenia przepuszczalności próbek skały zbiornikowej pod wpływem oddziaływania płuczki bazowej oraz płuczek z dodatkiem blokatorów, a także badania filtracji przez rdzenie skalne. Na podstawie uzyskanych w toku realizacji pracy wyników badań określono, które z badanych składów są najbardziej efektywne w zapobieganiu uszkodzenia przepuszczalności skały strefy przyodwiertowej.

Słowa kluczowe: płuczka wiertnicza, materiał mostkujący, przepuszczalność.

ABSTRACT: Reservoir rocks are characterized by a system of fissures and pores in which hydrocarbons accumulate. The drilling process requires the use of liquids that are able to provide the appropriate degree of sealing to minimize the risk of damage to the deposit. Penetration of an excessive amount of the solid phase or filtrate into the deposit rock may lead to permanent damage to the permeability, which results in the limitation or complete inability to exploit the hydrocarbons. Solid particles with dimensions smaller than the rock pore diameters penetrate deep into and block the pore channels, reducing the permeability. In turn, the penetrating filtrate causes the occurrence of many physical and chemical phenomena in the reservoir rock, where the decisive role is played by the swelling and dispersion of clay minerals included in the reservoir rock as well as adhesive-capillary phenomena. This article presents the results of research carried out in order to develop liquid compositions characterized by the best ability to produce a tight sealing deposit on the borehole wall, which at the same time will minimize damage to the near-well zone by minimizing the penetration of filtrate and solid phase particles. As bridging agents, in addition to traditional carbonate blockers, modern agents such as ground hausmanite (trimanganese tetroxide) have been used. Research was carried out on the selection of the composition of the drilling fluid, the rheological parameters of which will ensure the suspension of the solid phase in the form of various types of bridging agents. Following the development of the base mud, its composition was modified by adding different bridging agents configurations. The sets of agents added to the drilling mud varied both in terms of chemical structure and particle size. Such modified drilling muds were tested for technological properties, such

Autor do korespondencji: B. Jasiński, e-mail: bartlomiej.jasinski@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 19.02.2022 r. Zatwierdzono do druku: 22.04.2022 r.

as rheological parameters, API filtration, and pH. In the next stage, laboratory tests were carried out on the damage to the permeability of reservoir rock samples under the influence of the base mud and muds with the addition of bridging agents, and filtration through the rock cores. Based on the research obtained in the course of the work, it was determined which of the tested compositions are the most effective in preventing damage to productive zone.

Key words: drilling mud, bridging agent, permeability.

Wstęp

Uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej jest często przyczyną znacznej redukcji poziomu wydobywania węglowodorów. Może ono wystąpić podczas wiercenia, rdzeniowania, zbrojenia otworu, eksploatacji, rekonstrukcji lub stosowania wtórnych metod intensyfikacji wydobywania. Rozróżnia się kilka głównych przyczyn uszkodzenia przepuszczalności tych skał podczas procesu wiercenia (Mungan, 1965; Rahman et al., 1995; van Oort, 2003; Caenn et al., 2011; Stec, 2017; Alvarez et al., 2019; Uliasz, 2021):

- blokowanie kanalików porowych przez fazę stałą pochodzącą z płuczki wiertniczej;
- oddziaływanie fazy wodnej na lepiszcze ilaste, co powoduje jego hydratację i pęcznienie lub dyspersję cząstek koloidalnych i zatykanie porów na skutek ich przemieszczania się wraz z wodą złożową;
- blokowanie fazą płynną na skutek wprowadzenia wody do formacji podczas procesu wiercenia (blokada wodna);
- wytrącanie się nierozpuszczalnych osadów przy zetknięciu się zasadowego filtratu z cieczy wiertniczej ze zmineralizowaną wodą złożową.

Pogorszenie przepuszczalności strefy przyodwiertowej może wystąpić również samoczynnie po długotrwałym przyplywie do odwiertu płynu złożowego z poziomu produktywnego. W zależności od wielkości obniżenia ciśnienia i temperatury wokół odwiertu w czasie przyplywu medium złożowego – może wystąpić wytrącenie związków parafinowych i asfaltów lub powstawanie emulsji, powodując kolmatację ośrodka porowatego oraz wtórne uszkodzenie przepuszczalności (Uliasz, 2021).

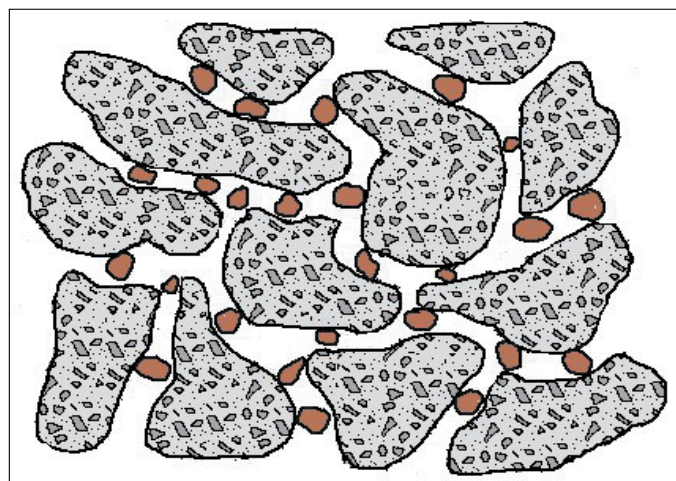
W celu ograniczenia uszkodzenia przepuszczalności strefy przyodwiertowej w składach cieczy wiertniczych stosuje się specjalnie dobrane środki polimerowe oraz fazę stałą w postaci środków mostkujących (blokatorów) o odpowiednich do przewiercanej skały rozmiarach cząstek. Najważniejszym zadaniem blokatorów jest ochrona strefy przyodwiertowej poprzez utworzenie na ścianie odwiertu tymczasowego osadu, ograniczającego inwazję filtratu z cieczy w pory skał zbiornikowych. Poprzez dodatek tego rodzaju materiałów do płuczek wiertniczych można również regulować takie parametry jak filtracja i gęstość. Zatem projektując skład płuczki wiertniczej,

należy uwzględnić takie ilości soli i materiału mostkującego, aby otrzymać odpowiednią do warunków geologiczno-złożowych gęstość (Uliasz, 2021).

Mechanizmy uszkodzenia strefy przyodwiertowej

Blokowanie kanalików porowych przez fazę stałą pochodzącą z płuczki wiertniczej

Ryzyko blokowania kanalików porowych cząsteczkami fazy stałej zachodzi, gdy ciecz wiertnicza znajduje się w stanie nadciśnienia w stosunku do wartości ciśnienia matrycy skalnej (Stec, 2017). Fazą stałą wnikaącą w pory skał mogą być zawarte w cieczy materiały obciążające, materiały regulujące filtrację, blokatory oraz zwierziny (Al-Yami et al., 2008). Cząstki te wnikaą wraz z filtratem w głąb skały, powodując zmiany ich właściwości fizykochemicznych i blokowanie, kolmatowanie przestrzeni porowych (rysunek 1).



Rysunek 1. Schemat blokowania kanalików porowych przez cząstki fazy stałej

Figure 1. Scheme of blocking pores by solid phase particles

Zasięg kolmatacji strefy przyodwiertowej zależy od głębokości wnikaania cząstek fazy stałej w pory skały i właściwości jej filtratu. W uszkodzonej skale można rozróżnić strefę kolmatacji powierzchniowej – tworzy ją osad filtracyjny i wewnątrzporowej – powodowanej przez cząstki stałe unoszone przez filtrat, a także strefę migracji filtratu (Herman i Pólchłopek, 1996, Uliasz, 2021).

Oddziaływanie fazy wodnej na lepiszcze ilaste

Hydratacja minerałów ilastych wchodzących w skład szkieletu skały, na skutek oddziaływania na nie fazy wodnej, może prowadzić do ich pęcznienia bądź dyspersji.

Pęcznienie minerałów ilastych jest klasycznym mechanizmem uszkodzenia strefy przyodwiertowej, gdy pod wpływem wody minerały hydrofilne, takie jak montmorylonit, illit czy smektyt, ulegają hydratacji. W minerałach ilastych zachodzi specyficzne oddziaływanie między wodą a substancją ilastą. Istnienie niewysyconych ładunków na krawędziach pakietów minerałów ilastych oraz izomorficznych podstawień jonowych w sieci krystalicznej powoduje, że pakiety te posiadają niewielki ładunek elektryczny. Pakiety o ładunkach jednoimiennych odpychają się, co ułatwia wnikanie w przestrzenie międzypakietowe kationów i dipolowych cząsteczek wody równoważących ładunek pakietu, co powoduje zwiększenie odległości między przestrzeniami międzypakietowymi (Błaż, 2010; Zima et al., 2017; Uliasz, 2020, 2021).

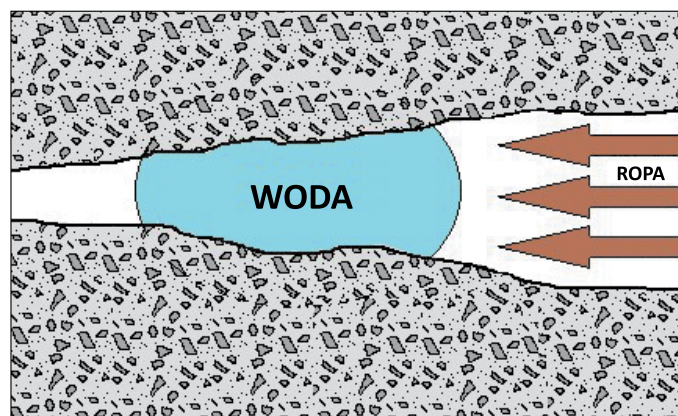
Dyspersja minerałów ilastych jest zjawiskiem powstającym w wyniku adsorpcji wody przez te minerały, powodującym zarówno spadek wytrzymałości skały i utratę stateczności ściany otworu wiertniczego, jak też powstawanie nadmiaru fazy stałej w płuczce wiertniczej. Intensywność i ilość zaadsorbowanej wody w dużym stopniu zależy od składu mineralnego skały ilastej, struktury minerałów, kompaktacji, a także braku równowagi jonowej między skałą a płuczką. Skutki dyspersji skał ilasto-łupkowych, rozpatrywane pod kątem intensywności adsorbowania wody, ujawniają bezpośrednie trudności wynikające z ich przewiercania, które prowadzą w większości przypadków do zwiększania się średnicy otworu wywołanego sypaniem skał i powstawaniem kawern lub do zmniejszania się średnicy otworu na skutek pęcznienia oraz plastycznego płynięcia (Błaż, 2010; Zima et al., 2017; Uliasz, 2020, 2021).

Blokowanie fazą płynną w wyniku wprowadzenia wody do formacji podczas procesu wiercenia

Jednym z najczęstszych mechanizmów uszkodzenia przewodności hydraulicznej formacji o niskim ciśnieniu oraz niskiej przepuszczalności i porowatości jest blokowanie porów skalnych wodą (rysunek 2). Występowanie tego zjawiska może zmniejszyć przepuszczalność skały dla ropy nawet powyżej 70%, natomiast w złożach o dużym stopniu szcerpania blokada wodna może stanowić podstawową przyczynę zakończenia produkcji odwiertu (Zhang et al., 2009; Caenn et al., 2011).

Filtrat, przenikając do skały zbiornikowej, powoduje przemieszczanie i wypieranie pod wpływem ciśnienia kapilarnego płynów złożowych z jej porów, które występują w postaci nieregularnej sieci kanałów i mikroporów o wymiarach kapilar. Podczas równoczesnego przemieszczania się dwóch niemieszających się cieczy każda z nich wykazuje aktywność względem

powierzchni porów. Ich przepływ zależy zatem od charakteru zwilżalności powierzchni porów, określanego poprzez wielkość kąta zwilżania i pośrednio napięcia powierzchniowego. Im mniejsze napięcie powierzchniowe na granicy rozdziału faz, tym ciecz lepiej zwilża powierzchnię porów. Wytłaczanie płynów złożowych filtratem zachodzi w skałach zbiornikowych, których powierzchnie porów są hydrofilowe (wodozwilżalne). W sytuacji gdy ich powierzchnie są hydrofobowe (niezwilżalne wodą, lecz dobrze zwilżalne olejem), ciśnienie kapilarne przeciwdziała przepływowi płynów w złożu, zwiększając opory przepływu (Liu i Civan, 1996; Al-Yami et al., 2008; Uliasz, 2021).



Rysunek 2. Schemat blokowania kanałków porowych wodą
Figure 2. Scheme of blocking pores with water

Rodzaje materiałów mostkujących

Blokatory organiczne

Do blokatorów organicznych należy między innymi blokator celulozowy produkowany ze zmielonych skorupki orzeszków ziemnych, które poddawane są odpowiedniej przeróbce do postaci proszku celulozowego. Stanowi on mieszaninę mikrowłókien i mikroplątków o wymiarach w zakresie 1–500 µm, których pojedyncze cząsteczki mają postać spiralnej sprężynki. Jest to materiał obojętny i nierozpuszczalny w wodzie, odporny na wysokie temperatury (do 200°C) oraz biodegradowalny (Raczkowski i Półchłopek, 1998). Stosowany jest zarówno w składach płuczek do dowiercania złóż surowców płynnych, jak i w cieczach roboczych o różnym zasoleniu, których parametry reologiczno-strukturalne i filtracja kontrolowane są skrobiowymi lub celulozowymi koloidami ochronnymi oraz biopolimerem. Blokator celulozowy dzięki różnym wymiarom cząstek oraz ich kształtom przyczynia się do uszczelnienia skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej poprzez wytworzenie zarówno wewnętrznej blokady w ich przestrzeni porowej, jak i osadu filtracyjnego na ścianie odwiertu. Warunkiem uszczelnienia jest występowanie różnicy ciśnień, za sprawą której wciśnięte do przyodwiertowych porów

cząstki włókniste, zazębiając się, wypełniają ich przestrzeń (Raczkowski i Pólchłopek, 1998; Uliasz, 2021).

Blokatory nieorganiczne

Bardzo szeroko wykorzystywanym w przemyśle wiertniczym blokatorem nieorganicznym jest węglan wapnia (CaCO_3). Występuje w przyrodzie jako składnik wielu minerałów (m.in. kalcytu) oraz skał (dolomitu, kredy, marmuru). Jako środek stosowany w technologii płuczkowej pozyskiwany jest przez zmielenie marmuru. Blokatory węglanowe występują w różnej ziarnistości, od kilku mikrometrów aż do 3 mm. Odpowiednio dobrany rozmiar ziaren umożliwia uszczelnienie osadu filtracyjnego, skutecznie ograniczając migrację płynu i fazy stałej w głąb skał zbiornikowych w strefie przyotworowej.

Z uwagi na zróżnicowaną wielkość cząstek, obojętność chemiczną produktu oraz łatwość usuwania ze ściany odwiertu blokatory węglanowe są powszechnie stosowane nie tylko jako środki ograniczające filtrację, ale również jako materiały obciążające ciecz wiertnicze do gęstości $1,5 \text{ g/cm}^3$ (BDC Group; PSPW; Schlumberger Oilfield Glossary; Jasiński, 2018; Uliasz, 2021).

Węglan wapnia charakteryzuje się bardzo dobrą rozpuszczalnością w kwasie. Często znajduje zastosowanie w składach cieczy roboczych do okresowego blokowania strefy przyodwiertowej. Jako materiał niepęczniący i niedyspergujący w wodzie ani solance, nie ma właściwości strukturotwórczych. W związku z tym dla uzyskania stabilnego układu cieczy roboczej konieczne jest stosowanie odpowiednich polimerów umożliwiających jego zawieszenie w suspensji cieczy (Uliasz i Herman, 2007, 2008; Uliasz, 2021).

Kolejnym materiałem nieorganicznym, który może znaleźć zastosowanie w technologii płuczkowej jako środek mostkujący, jest tetratlenek trimanganu (Mn_3O_4). W przyrodzie występuje jako stosunkowo rzadki minerał o nazwie hausmanit. Najczęściej współwystępuje z takimi minerałami jak: baryt, hematyt, braunit, magnetyt, dolomit, kalcyt, psylo melan. W warunkach przemysłowych tetratlenek trimanganu pozyskuje się jako produkt uboczny procesu wytwarzania żelazomanganu (ferromanganu), w postaci brunatnoczerwonego drobnoziarnistego proszku. Cząsteczki charakteryzują się kulistym kształtem i wąskim zakresem średnicy ziaren (Baron et al., 1998; Al Moajil i Nasr-El-Din, 2013; Alrasheed et al., 2018). Tetratlenek trimanganu ma szereg właściwości, dzięki którym wydaje się, że celowe jest zastosowanie go jako środka blokującego uszkodzenie strefy przyodwiertowej (Baron et al., 1998; Al-Bagoury i Steele, 2012; Al Moajil i Nasr-El-Din, 2013; Sindi et al., 2019):

- gęstość wynosząca $4,8\text{--}4,85 \text{ g/cm}^3$, czyli o około 15% większa niż powszechnie stosowany jako środek obciążający baryt. W porównaniu z barytem charakteryzuje się również

o około 60% wyższą twardością oraz znacznie niższą ściepalnością z uwagi na niemal kulisty kształt cząstek;

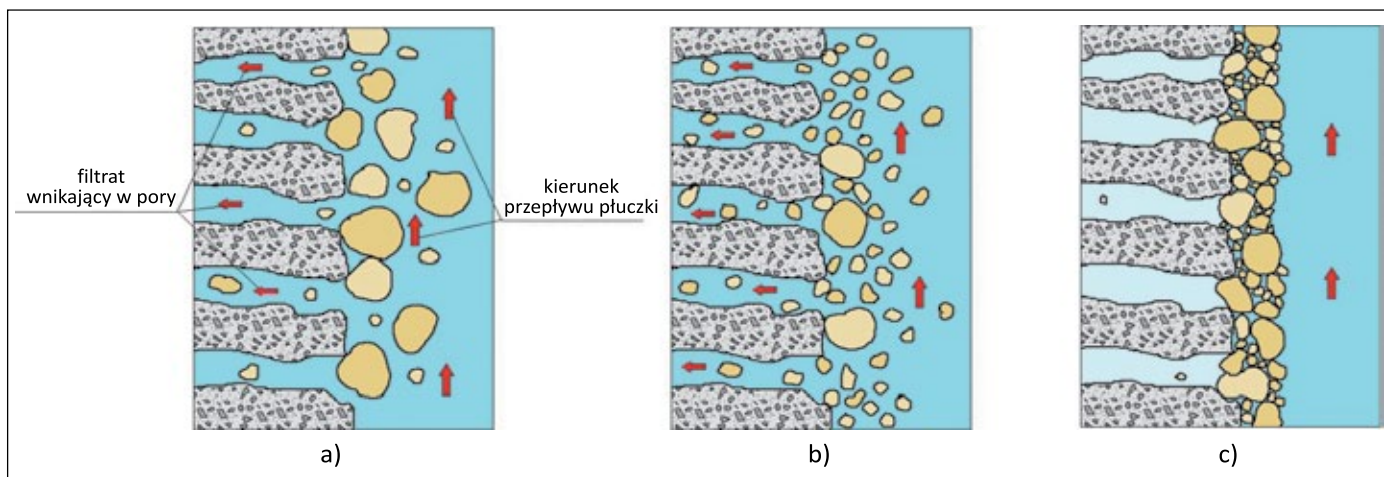
- niewielkie rozmiary cząstek sprawiają, że jego sedymentacja w porównaniu z klasycznymi środkami obciążającymi jest bardzo niska. Prędkość opadania cząsteczek Mn_3O_4 w wodzie jest około 200 razy niższa niż cząstek barytu;
- podatność na rozpuszczanie się w kwasach organicznych i nieorganicznych. Ta właściwość tetratlenku trimanganu umożliwia skuteczne usuwanie osadów filtracyjnych wytworzonych na ścianie otworu wiertniczego i tym samym odzyskanie przepuszczalności strefy przyodwiertowej. Należy jednak wziąć pod uwagę, że podczas reakcji niektórych kwasów z Mn_3O_4 mogą powstawać trudno rozpuszczalne osady. Takim przykładem może być kwas cytrynowy, który w reakcji z tetratlenkiem trimanganu tworzy nierozpuszczalny cytrynian manganu, mogący być źródłem zanieczyszczenia przestrzeni porowych. Stąd też dobór cieczy kwasującej powinien być poprzedzony testami laboratoryjnymi potwierdzającymi możliwość ich zastosowania do usunięcia osadu zawierającego Mn_3O_4 .

Nanomateriały

Do kolejnej grupy środków, które w szybkim tempie zdobywają popularność w technologii płuczkowej należą nanomateriały. Płuczki zawierające w swoim składzie jeden rodzaj nanocząstek nazywane są prostymi nanopłuczkami, natomiast płuczki zawierające więcej niż jeden rodzaj nanocząstek definiowane są jako zaawansowane nanopłuczki (Abdo i Haneef, 2012, 2016; Zima, 2017). Jednym z najczęściej wykorzystywanych w przemyśle nanomateriałów jest ditlenek krzemu (krzemionka SiO_2). Dostępność tego materiału oraz specyficzne właściwości przyczyniły się do jego szerokiego zastosowania. Cechuje go odporność na działanie wody oraz wysokich temperatur, a dodatkowo jest dobrym izolatorem. Średnica nanocząstek ditlenku krzemu produkowanego w przemyśle najczęściej zawiera się w przedziale od 5 nm do 1000 nm, a ich powierzchnia właściwa mieści się w zakresie od $545 \text{ m}^2/\text{g}$ do $2,73 \text{ m}^2/\text{g}$ (Jankiewicz et al., 2010; Dębińska, 2014, 2015; Zima, 2017). Autorzy licznych publikacji (Adel et al., 2014; Contreras et al., 2014; Ponmani et al., 2016; Salih et al., 2016; Salih i Bilgesu, 2017) potwierdzają wysoką skuteczność nanomateriałów w obniżaniu filtracji płuczek wiertniczych oraz zmniejszaniu uszkodzenia naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych.

Mechanizm uszczelniania strefy przyotworowej przez środki mostkujące

Dobór rodzaju blokatora i wielkości jego cząstek powinien być ściśle związany z właściwościami przewiercanych skał.



Rysunek 3. Stopień uszczelnienia w zależności od rozkładu wielkości cząstek blokatora: a) cząstki o zbyt dużej średnicy, b) cząstki o zbyt małej średnicy, c) prawidłowo dobrany blokator

Figure 3. Degree of sealing depending on the particle size distribution of bridging agent: a) particles with excessively large diameter, b) particles with excessively small diameter, c) properly selected bridging agents

Determinowane jest to głównie przez rozmiary porów skały zbiornikowej oraz jej przepuszczalność (Abrams, 1977; Dick et al., 2000; Ismail et al., 2021). Nieprawidłowo dobrany zakres wielkości cząstek materiałów mostkujących skutkuje brakiem szczelnego osadu na ścianie otworu i inwazją filtratu w złoże.

Na rysunku 3 przedstawiono trzy warianty doboru wielkości ziaren blokatorów. W przypadku wariantu a) większość cząstek jest znacznie większa niż gardziele porów, przez co nie są one w stanie utworzyć efektywnego osadu filtracyjnego. Część z nich jest porywana przez strumień płuczki wiertniczej, a pomiędzy cząstkami tworzą się kanaliki, przez które filtrat łatwo wnika w skałę. W przypadku wariantu b) dobrane cząstki blokatora są zbyt małe, co skutkuje ich wnikaniem w głąb struktury skały wraz z filtratem. Z kolei w wariantcie c) widać prawidłowy dobór rozkładu wielkości cząstek środków mostkujących. Optymalny dobór cząstek pod względem ich wielkości prowadzi do powstania szczelnego osadu filtracyjnego, przez który przenika minimalna ilość filtratu i cząstek fazy stałej.

Plan badań

W pierwszym etapie badań wytypowano materiały blokujące, których zadaniem było szybkie wytworzenie osadu filtracyjnego tymczasowo uszczelniającego strefę przyodwiertową i zapobiegnie przenikaniu filtratu do skał zbiornikowych. Przeprowadzono również ich analizę sitową, mającą na celu ustalenie składu granulometrycznego. Wytypowano materiały mostkujące:

- blokator węglanowy M25;
- blokator węglanowy M1000;

- blokator węglanowy M90 (otrzymany poprzez wyodrębnienie frakcji o rozmiarze ziaren 0,090–0,160 mm);
- blokator węglanowy M160 (otrzymany poprzez wyodrębnienie frakcji o rozmiarze ziaren 0,160–0,250 mm);
- Thru carb (modyfikowany blokator węglanowy);
- tetratlenek trimanganu.

Kolejnym krokiem był dobór płuczki wiertniczej, która miała być następnie modyfikowana przez dodatek środków blokujących. Jej skład opierał się na następującym zestawie polimerów strukturotwórczych: XCD, Polofix LV, PAC R oraz Rotomag. Następnie próbki płuczek o różnej koncentracji polimerów strukturotwórczych z dodatkiem środków blokujących w stężeniu 5,0% poddawane były badaniu stabilności przez okres 24 godzin w aparacie Turbiscan Tower. Celem tego badania był dobór optymalnego składu płuczki bazowej, której parametry reologiczno-strukturalne zapewniały stabilność struktury i brak sedymentacji blokatorów. Wybrana płuczka bazowa, charakteryzująca się najwyższą stabilnością, była modyfikowana przy użyciu pojedynczych materiałów w stężeniu 5,0% oraz różnych konfiguracji materiałów blokujących w stężeniach:

- 3,0% / 7,0%;
- 5,0% / 5,0%;
- 6,0% / 14,0%;
- 10,0% / 10,0%.

Uzyskane w ten sposób płuczki poddano badaniom właściwości technologicznych, takich jak: parametry reologiczno-strukturalne, filtracja, pH.

W ostatnim etapie przeprowadzono badania laboratoryjne uszkodzenia przepuszczalności próbek skały zbiornikowej pod wpływem oddziaływania płuczki bazowej i płuczek z dodatkiem blokatorów oraz badania filtracji przez rdzenie skalne.

Na podstawie wyników uzyskanych w toku realizacji badań określono, które z badanych składów są najbardziej efektywne w zapobieganiu uszkodzeniu strefy przyodwiertowej.

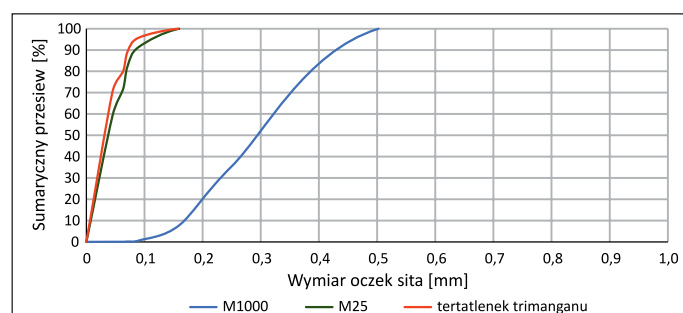
Omówienie wyników badań

Analiza sitowa materiałów blokujących

W celu dokładnego rozpoznania składu granulometrycznego zastosowanych do badań materiałów blokujących przeprowadzono analizę sitową z użyciem wytrząsarki wibracyjnej. Metoda ta polega na mechanicznym rozdzielaniu i skatalogowaniu poszczególnych frakcji o określonych średnicach ziaren. Po zważeniu kolejnych klas ziarnowych pozostałych na danym sicie ustala się procentowy udział poszczególnych frakcji w badanej próbce w stosunku do całości, co pozwala na nakreślenie krzywej uziarnienia.

Tabela 1. Rozkład rozmiarów cząstek zastosowanych blokatorów
Table 1. Particle size distribution of used bridging agents

Zakres rozmiaru cząstek [mm]	Procentowy udział		
	M1000	M25	tetratlenek trimanganu
<0,045	0,04	59,23	70,48
0,045–0,063	0,10	12,34	9,33
0,063–0,071	0,12	11,04	9,54
0,071–0,090	0,43	8,85	6,39
0,09–0,16	7,26	8,54	4,17
0,16–0,25	27,60	0	0,08
0,25–0,50	64,29	0	0
0,5–1,0	0,16	0	0



Rysunek 4. Krzywe granulometryczne środków M1000, M25 oraz tetratlenku trimanganu

Figure 4. Particle size curves of M1000, M25 and trimanganese tetroxide

W tabeli 1 oraz na rysunku 4 przedstawiono rozkład rozmiarów cząstek tetratlenku trimanganu, blokatora M25 oraz blokatora M1000. Największym udziałem najmniejszych cząstek charakteryzował się tetratlenek trimanganu, w którym 70,48% ziaren mieściło się w zakresie poniżej 0,045 mm.

Bardzo podobny rozkład wielkości cząstek miał blokator M25, w którego przypadku ziarna o średnicy mniejszej niż 0,045 mm stanowiły 59,23%. Z kolei w blokatorze M1000 udział cząstek o średnicy nieprzekraczającej 0,09 mm jest marginalny, a największą frakcję stanowią ziarna o średnicy w przedziale 0,25–0,5 mm (64,2%).

W celu zróżnicowania pod względem wielkości uziarnienia zastosowanych do badań środków z blokatora M1000 oddzielono przy użyciu wytrząsarki wibracyjnej frakcje 0,09–0,16 mm oraz 0,16–0,25 mm. Frakcje te oznaczano w dalszych badaniach jako M90 i M160.

Opracowanie składu płuczki bazowej

Płuczka zastosowana do badań musiała charakteryzować się wystarczająco wysokimi parametrami reologiczno-strukturalnymi, aby jej struktura po dodaniu środków blokujących pozostawała stabilna, a środki te nie ulegały sedymentacji. Przewidywano, że z uwagi na największy rozmiar cząstek najtrudniejszy do zawieszenia w płuczce będzie środek M1000.

Do opracowania optymalnego składu płuczki wykorzystano aparat Turbiscan Tower, który umożliwia bieżące śledzenie stabilności maksymalnie sześciu próbek jednocześnie. Pomiar prowadzono w temperaturze 25°C przez 24 godziny. Do oceny stabilności płuczki posłużono się współczynnikiem TSI (ang. *Turbiscan stability index*). Jest to bezwymiarowy współczynnik obliczany automatycznie dla każdej badanej próbki przez aparat, pozwalający w prosty sposób ocenić globalną niestabilność testowanej cieczy. Przyjęto, że stabilna ciecz, nieulegająca takim zjawiskom jak sedymentacja czy śmietankowanie, powinna charakteryzować się indeksem TSI mniejszym niż 1.

W toku badań przetestowano siedem składów płuczek, różniących się zawartością polimerów strukturotwórczych, głównie biopolimeru XCD, którego stężenie w płuczce 1 wynosiło 0,2%, a w płuczce 7 – 0,35%. Do każdej z przygotowanych płuczek dodawano wytypowane środki mostkujące w stężeniu 5,0%. Na podstawie uzyskanych wartości współczynnika TSI oceniono, który skład płuczki gwarantuje najwyższą stabilność i najmniejsze ryzyko wystąpienia zjawiska sedymentacji.

Na rysunku 5 zestawiono wartości współczynnika TSI wszystkich testowanych płuczek po 24-godzinnym pomiarze. Bardzo wysoką wartość współczynnika zarejestrowano w przypadku płuczek modyfikowanych dodatkiem środka Thru carb – w płuczce 1 i 3 było to nawet powyżej 16. Wynikało to prawdopodobnie z faktu, że środek ten nie dyspergował się w płuczce w sposób jednorodny, a jego cząstki łączyły się w większe agregaty. Wysokie wartości TSI uzyskano również w przypadku blokatora węglanowego M1000 – we wszystkich płuczce współczynnik wahał się w zakresie 5–7. Spośród przebadanych składów najgorsze wyniki uzyskano

w przypadku płuczek 1–3. Zbyt niskie wielkości parametrów reologiczno-strukturalnych były przyczyną tego, że nawet blokatory o niewielkich rozmiarach ziaren ulegały sedymentacji. Z kolei najlepsze rezultaty osiągnięto w przypadku płuczki 7, której współczynnik TSI był niższy od 1 w obecności: tetra-tlenku trimanganu, M25, M90 i M160 (odpowiednio: 0,56, 0,51, 0,64 i 0,86), dlatego jako płuczkę bazową do dalszych badań wytypowano ten skład.

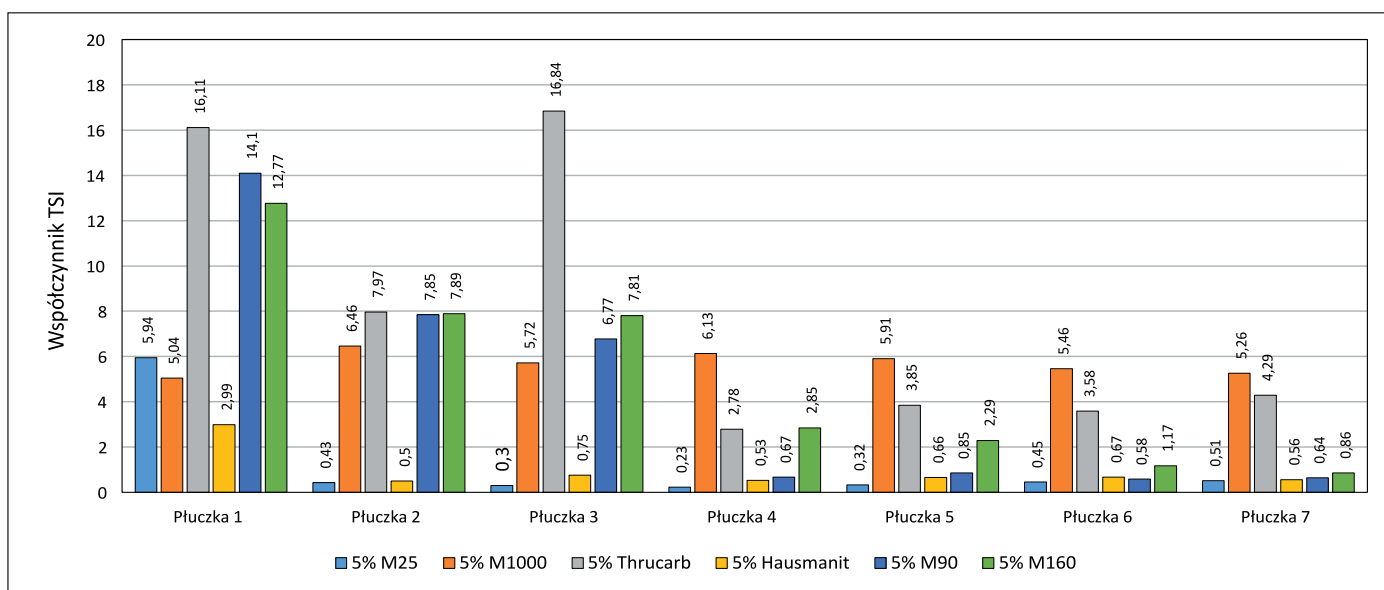
Badania podstawowych parametrów technologicznych płuczek modyfikowanych różnymi zestawami materiałów mostkujących

Kolejny etap badań obejmował określenie parametrów płuczek zmodyfikowanych dodatkami kombinacji dwóch materiałów mostkujących, ze szczególnym uwzględnieniem pomiaru filtracji API. Pary blokatorów dodawanych do płuczki utworzono spośród następujących środków: blokator M25,

Tabela 2. Skład i parametry płuczek

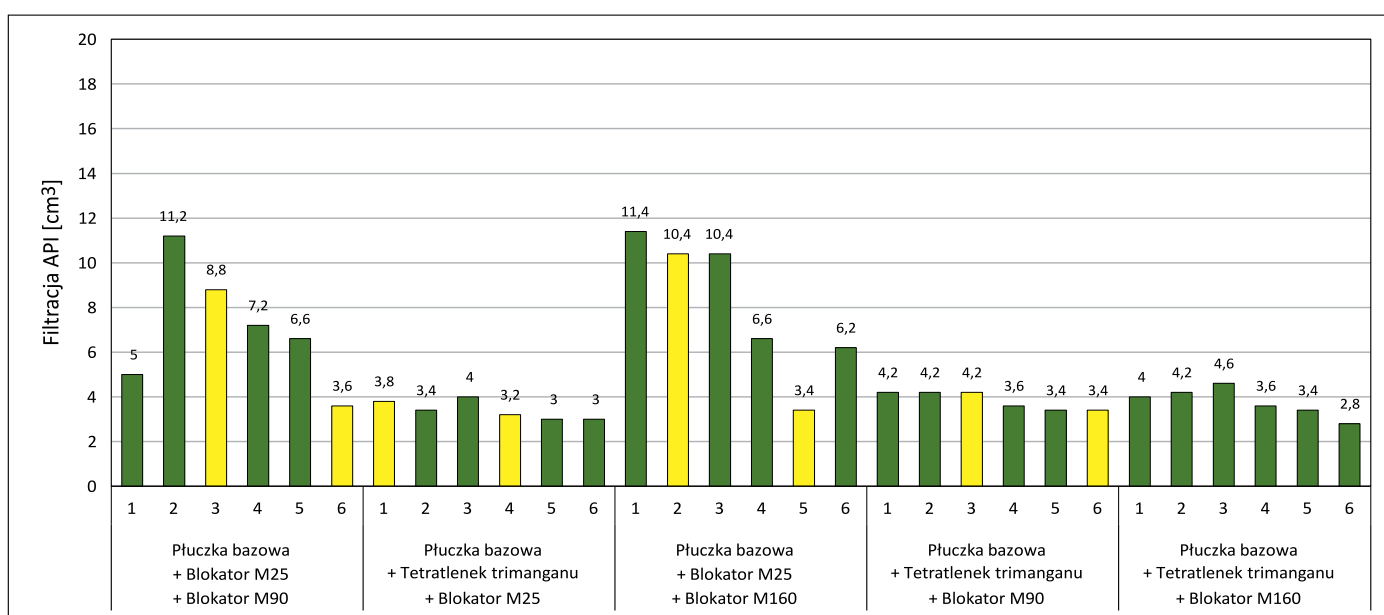
Table 2. The composition and parameters of muds

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość [g/cm ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna I/II [Pa]	Filtracja API [cm ³]	pH
			η_{pl}	η_s	τ_y			
1	Biostat 0,10 XCD 0,20 Polofix LV 1,00 PAC R 0,20 KCl 5,00	1,03	14	21,5	7,2	1,3/2,5	57,9	9,2
2	Biostat 0,10 XCD 0,20 Polofix LV 1,00 PAC R 0,20 Rotomag 3,00 KCl 5,00	1,03	39	61,0	12,9	3,1/4,3	22,8	9,5
3	Biostat 0,10 XCD 0,25 Polofix LV 1,00 PAC LV 0,20 Rotomag 3,00 KC 5,00	1,03	31	47,0	15,3	2,1/3,6	24,0	9,4
4	Biostat 0,10 Defpol 0,10 XCD 0,30 Polofix LV 1,00 PAC LV 0,20 Rotomag 3,00 KCl 5,00	1,03	32	50,0	17,2	2,7/4,4	18,2	9,4
5	Biostat 0,10 Defpol 0,10 XCD 0,30 Polofix LV 1,00 PAC R 0,20 Rotomag 3,00 KCl 5,00	1,03	34	56,0	21,1	3,4/5,2	16,4	9,4
6	Biostat 0,10 Defpol 0,10 XCD 0,35 Polofix LV 1,00 PAC LV 0,20 Rotomag 3,00 KCl 5,00	1,03	35	55,5	19,6	3,5/5,6	14,2	9,3
7	Biostat 0,10 Defpol 0,10 XCD 0,35 Polofix LV 1,00 PAC R 0,20 Rotomag 3,00 KCl 5,00	1,03	36	61,0	23,9	4,0/5,9	14,0	9,3



Rysunek 5. Wartości współczynnika TSI badanych płuczek po 24 godzinach

Figure 5. TSI values of the tested muds after 24 hours



Rysunek 6. Filtracja API płuczek z różnymi kombinacjami środków mostkujących – kolorem żółtym oznaczono płuczki wybrane do następnego etapu badań

Figure 6. API filtration of muds with various combinations of bridging agents – yellow color marks drilling muds selected for the next stage of the research

blokator M90, blokator M160, tetratlenek trimanganu. W tym etapie zrezygnowano z blokatorów M1000 oraz Thru carb z uwagi na niezadowalające wyniki uzyskane w poprzedniej fazie badań.

Cząsteczki M1000 okazały się zbyt duże, a więc do ich zawieszenia w suspensji płuczkowej należałoby zastosować bardzo wysokie stężenie polimerów strukturotwórczych. Duże wielkości ziaren tego materiału stawiają go raczej w roli środka do zapobiegania ucieczkom płuczki lub cieczy roboczej niż klasycznego materiału ograniczającego uszkodzenie strefy

przyodwiertowej. Z kolei blokator Thru carb wykazywał ograniczoną zdolność do dyspergowania w przygotowanej płuczce, tworząc przy tym agregaty o dużych rozmiarach.

Do wytypowanej w poprzedniej fazie badań płuczki bazowej dodawano następujące pary blokatorów:

- blokator M25 oraz blokator M90;
- tetratlenek trimanganu oraz blokator M25;
- blokator M25 oraz blokator M160;
- tetratlenek trimanganu oraz blokator M90;
- tetratlenek trimanganu oraz blokator M160.

Na rysunku 6 zestawiono wartości filtracji API wszystkich płuczek z podwójnym zestawem blokatorów. Cyfry od 1 do 6, umieszczone pod słupkami, oznaczają następujące kombinacje: 1 – 3,0% środka A oraz 7,0% środka B, 2 – 5,0% środka A oraz 5,0% środka B, 3 – 7,0% środka A oraz 3,0% środka B, 4 – 6,0% środka A oraz 14,0% środka B, 5 – 10,0% środka A oraz 10,0% środka B, 6 – 14,0% środka A oraz 6,0% środka B. Najwyższą filtracją charakteryzowały się płuczki modyfikowane zestawami M25 + M90 oraz M25 + M160, w kilku przypadkach przekraczając nawet 10 cm³ (5,0% M25 + 5,0% M90, 3,0% M25 + 7,0% M160, 5,0% M25 + 5,0% M160 oraz 7,0% M25 + 3,0% M160).

Bardzo niskie wartości filtracji uzyskano, stosując kombinację tetratlenek trimanganu z blokatozem węglanowym. W przypadku połączenia z M25 filtracja wynosiła od 3,0 cm³

do 4,0 cm³, z M90 było to od 3,4 cm³ do 4,2 cm³, zaś z blokatozem M160 – od 2,8 cm³ do 4,6 cm³. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że tetratlenek jest materiałem bardzo skutecznie ograniczającym filtrację płuczek wiertniczych, zarówno stosowany jako samodzielny blokator, jak i w połączeniu z drugim środkiem mostkującym. Jako środek o bardzo niewielkich rozmiarach cząsteczek może on łatwo wnikać pomiędzy większe cząstki fazy stałej i skutecznie doszczelniać wytworzony osad filtracyjny. Gorsze wyniki pomiaru filtracji uzyskano w płuczках bez dodatku tetratlenku trimanganu, a więc w płuczках z dodatkiem kombinacji samych blokatorów węglanowych.

Spośród przetestowanych płuczek z podwójnym zestawem blokatorów wybrano osiem, które badane były w dalszej części pracy, a więc w pomiarze filtracji przez rdzeń oraz określeniu

Tabela 3. Parametry płuczek wyselekcjonowanych do dalszego etapu badań

Table 3. Parameters of drilling muds selected for the next stage of the research

Płuczka	Skład płuczki [%]	Gęstość [g/cm ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna I/II [Pa]	Filtracja API [cm ³]	pH
			η_{pl}	η_s	τ_y			
A	Płuczka bazowa	1,03	36	61,0	23,9	4,0/5,9	14,0	9,3
B	Płuczka bazowa + blokator M25 5,0	1,07	46	74,5	27,3	5,0/6,6	5,2	9,3
C	Płuczka bazowa + blokator M1000 5,0	1,07	45	73,5	27,3	5,0/6,5	9,4	9,3
D	Płuczka bazowa + Thru carb 5,0	1,07	50	78,0	26,8	5,5/7,0	14,6	9,1
E	Płuczka bazowa + tetratlenek trimanganu 5,0	1,08	44	73,5	28,2	4,9/6,5	4,8	9,3
F	Płuczka bazowa + blokator M25 7,0 + blokator M90 3,0	1,11	46	76,0	28,7	5,1/6,8	8,8	9,2
G	Płuczka bazowa + blokator M25 14,0 + blokator M90 6,0	1,18	36	55,0	18,2	3,2/4,5	3,6	9,1
H	Płuczka bazowa + tetratlenek trimanganu 3,0 + blokator M25 7,0	1,10	46	76,0	28,7	5,0/6,7	3,8	9,3
I	Płuczka bazowa + tetratlenek trimanganu 6,0 + blokator M25 14,0	1,17	43	70,0	25,9	3,9/5,6	3,2	9,1
J	Płuczka bazowa + blokator M25 5,0 + blokator M160 5,0	1,11	47	77,0	28,7	4,7/6,2	10,4	9,1
K	Płuczka bazowa + blokator M25 10,0 + blokator M160 10,0	1,18	47	72,0	23,9	3,8/5,0	3,4	9,1
L	Płuczka bazowa + tetratlenek trimanganu 7,0 + blokator M90 3,0	1,11	45	73,5	27,9	4,5/5,9	4,2	9,4
M	Płuczka bazowa + tetratlenek trimanganu 14,0 + blokator M90 6,0	1,20	37	57,0	19,2	2,7/3,5	3,4	9,4

utruty przepuszczalności próbki (na rysunku 6 oznaczono je żółtymi słupkami). Oprócz nich testowano również niezmodyfikowaną płuczkę bazową oraz próbki z dodatkiem 5,0% środków: M25, M1000, Thru carb oraz tetratlenku trimanganu. Płuczki oznaczono literami od A do M, a ich dokładny skład i parametry przedstawiono w tabeli 3.

Pomiar filtracji na rdzeniach

Do wykonania pomiarów filtracji oraz uszkodzenia przepuszczalności użyto próbek skał przygotowanych z piaskowca

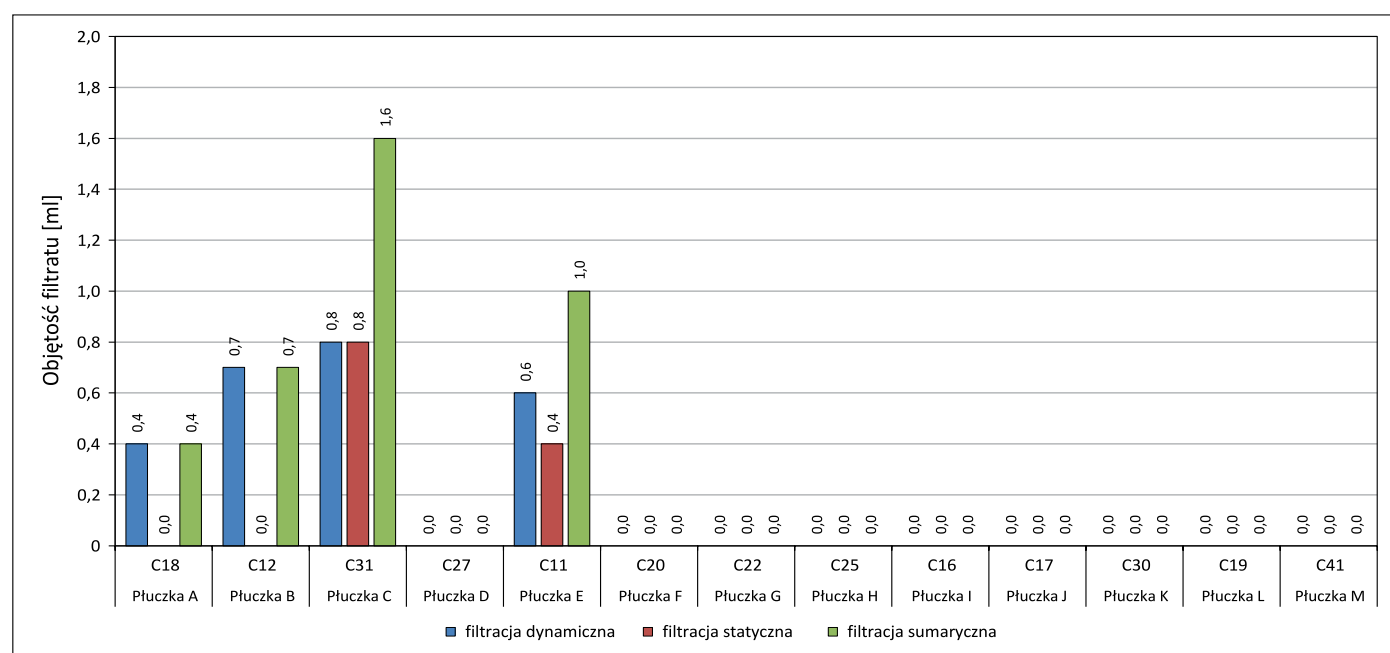
sztyłowieckiego. Ponieważ głównym celem badań był dobór odpowiednich blokatorów oraz ich uziarnienia w celu zminimalizowania uszkodzenia przepuszczalności skał, zdecydowano się na wykonanie pomiarów z użyciem dwóch grup próbek skał, o zróżnicowanych porowatościach, a zatem i przepuszczalnościach. Powinno to dać lepszy obraz wpływu płuczek na próbki skalne, gdyż jak wiadomo, w warunkach rzeczywistych w otworze przewiercane są skały o zróżnicowanych porowatościach i przepuszczalnościach i wpływ stosowanej jednej płuczki będzie oczywiście różny dla skał o różnych

Tabela 4. Parametry próbek skał użytych w badaniach

Table 4. Parameters of rock samples used in the research

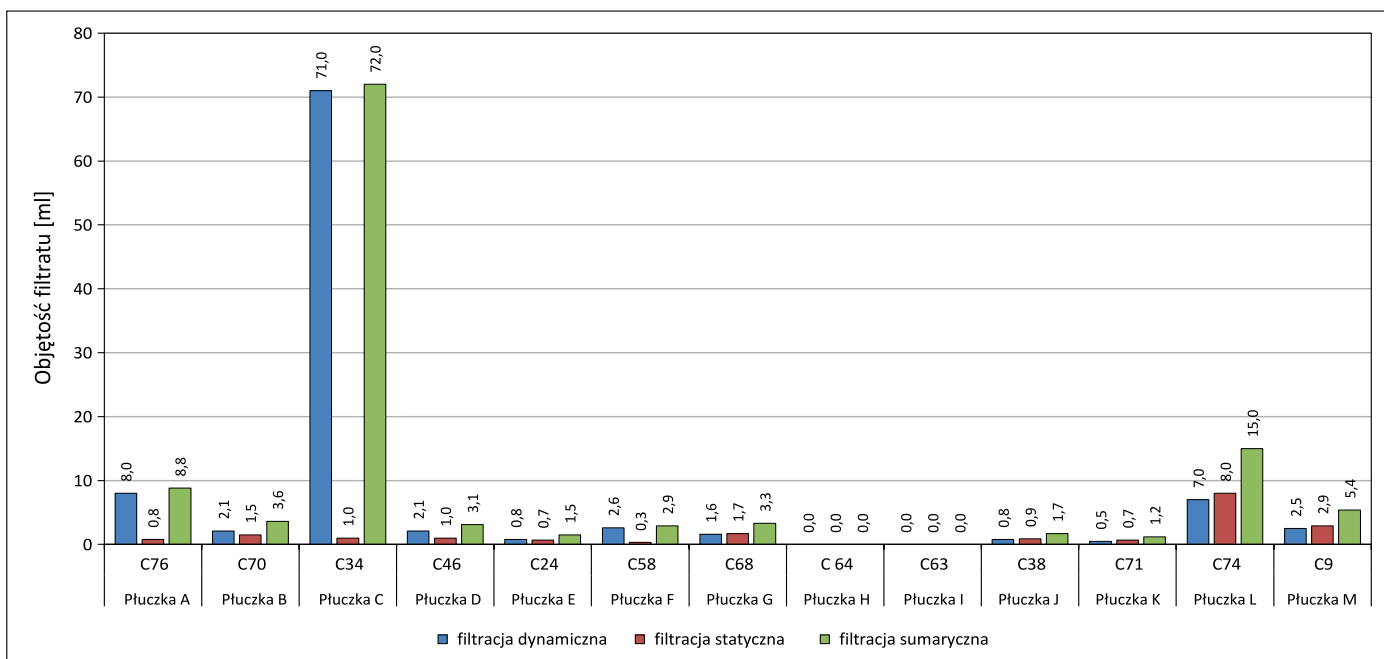
Nr próbki	Długość próbki [cm]	Średnica próbki [cm]	Porowatość [%]		Przepuszczalność [mD]
			AccuPyc	wagowo	
C18	4,85	2,54	16,85	18,86	2,78
C76	4,16	2,54	24,32	23,94	635,19
C12	5,04	2,54	16,27	17,30	0,97
C70	4,15	2,54	24,20	25,04	598,30
C31	4,91	2,53	16,95	16,46	1,30
C34	3,91	2,51	24,82	25,31	408,61
C27	4,62	2,54	16,10	17,48	1,24
C46	4,34	2,53	25,43	25,09	571,85
C11	5,03	2,54	16,19	17,18	2,26
C24	4,60	2,41	23,38	25,39	242,00
C20	4,41	2,53	16,47	18,38	3,41
C58	4,45	2,5	23,79	24,97	963,57
C22	5,02	2,53	16,39	18,94	2,94

Nr próbki	Długość próbki [cm]	Średnica próbki [cm]	Porowatość [%]		Przepuszczalność [mD]
			AccuPyc	wagowo	
C68	4,52	2,51	23,74	25,07	791,67
C25	4,79	2,53	16,82	18,20	2,21
C64	3,99	2,53	22,84	24,08	303,83
C16	4,55	2,52	15,66	16,94	2,32
C63	4,56	2,51	22,91	23,04	759,34
C17	5,06	2,54	16,02	17,67	0,90
C38	4,41	2,53	25,13	25,13	909,98
C30	4,69	2,54	17,44	18,53	1,64
C71	3,88	2,53	22,68	23,27	392,53
C19	4,05	2,53	17,03	17,88	1,95
C74	4,00	2,54	21,83	22,53	617,31
C41	3,74	2,53	17,14	15,07	3,33
C9	4,47	2,54	21,28	22,55	45,96



Rysunek 7. Wielkości filtracji przez próbki o niskich przepuszczalnościach początkowych

Figure 7. Filtration through samples with low permeability



Rysunek 8. Wielkości filtracji przez próbki o wysokich przepuszczalnościach początkowych

Figure 8. Filtration through samples with high permeability

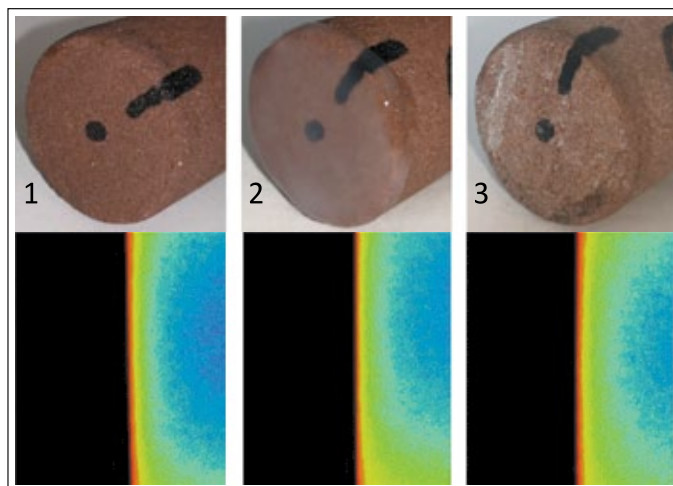
parametrach. Z pozyskanego piaskowca szydlowieckiego wycięto próbki walcowe o średnicy 1 cala i długości 4,0–5,0 cm, po czym podzielono je na dwie grupy, a do dalszych pomiarów wybrano grupy o porowatości około 15–16% oraz 23–25%. W tabeli 4 zestawiono dane tych próbek.

W celu łatwiejszego przeanalizowania wyników przedstawiono filtrację z podziałem na dwie grupy. Pierwsza to wielkości filtracji przez próbki o małych przepuszczalnościach początkowych (0,9–3,4 mD) (rysunek 7), druga – o dużych przepuszczalnościach (46–963,6 mD) (rysunek 8). Analiza danych uwidacznia, że filtracja przez próbki o przepuszczalności poniżej 3,4 mD była zdecydowanie niższa – filtracja całkowita nie przekroczyła wielkości 1,6 cm³/60 minut, a dla 9 próbek wyniosła zero. Odmienne wygląda sytuacja w przypadku próbek o przepuszczalności rzędu kilkudziesięciu oraz kilkuset mD, ponieważ tylko w dwóch przypadkach w tej grupie filtracja całkowita wyniosła zero.

W przypadku próbek C27 (płuczka D), C20 (płuczka F), C22 (płuczka G), C25 i C64 (płuczka H), C16 i C63 (płuczka I), C17 (płuczka J), C30 (płuczka K), C19 (płuczka L) oraz C41 (płuczka M) nie zanotowano ani filtracji dynamicznej, ani statycznej, czyli przez te próbki nie wystąpił przepływ filtratu. Można zatem przypuszczać, że osad filtracyjny powstały na czole próbki spełnił dobrze swoje zadanie zarówno w przypadku próbek o małej, jak i dużej przepuszczalności, czyli zablokował wnikanie do przestrzeni porowej skały fazy stałej z płuczki oraz filtratu na długości rzędu 4–5 cm.

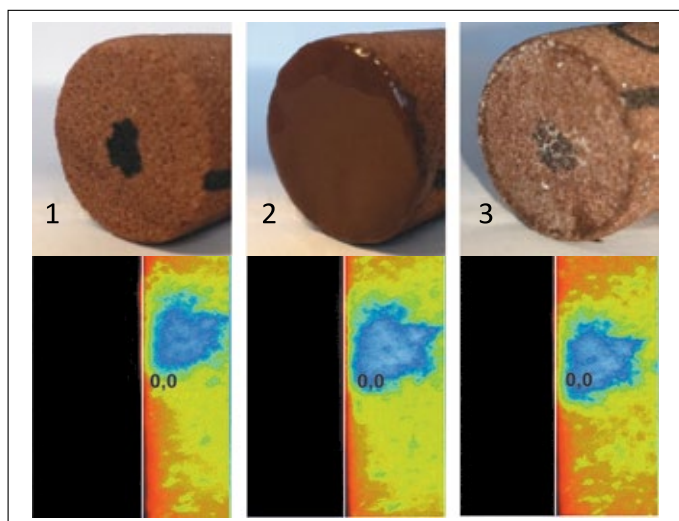
Dla trzech próbek, tj. C9 (płuczka M), C76 (płuczka A), C74 (płuczka L), zarejestrowano wyższe wielkości filtracji

całkowitej (filtracja w warunkach dynamicznych i statycznych), odpowiednio 5,4 cm³, 8,8 cm³ i 15 cm³. Tylko dla jednej próbki, C34 (płuczka nr C), filtracja była bardzo wysoka i wyniosła łącznie 72 cm³/60 minut. W pozostałych przypadkach wielkość filtracji mieściła się w przedziale 0,4–3,6 cm³/60 minut, co pozwala przypuszczać, że również w przypadku próbek o dużej przepuszczalności zastosowane blokatory powinny spełnić swoje zadanie i zabezpieczyć strefę przyodwiertową



Rysunek 9. Zdjęcia osadu oraz zdjęcia RTG z zaznaczonymi grubościami osadu próbki C18: 1) przed oddziaływaniem płuczki A, 2) bezpośrednio po oddziaływaniu płuczki, 3) po końcowym pomiarze przepuszczalności

Figure 9. Pictures of the sediment and X-ray pictures with the C18 sample sediment thicknesses marked: 1) before exposure to mud A, 2) immediately after exposure to mud, 3) after final permeability measurement



Rysunek 10. Zdjęcia osadu oraz zdjęcia RTG z zaznaczonymi grubościami osadu próbki C64: 1) przed oddziaływaniem płuczką H, 2) bezpośrednio po oddziaływaniu płuczki, 3) po końcowym pomiarze przepuszczalności

Figure 10. Pictures of the sediment and X-ray pictures with the C64 sample sediment thicknesses marked: 1) before exposure to mud H, 2) immediately after exposure to mud, 3) after final permeability measurement

przed głębokim wnikaniem fazy stałej i filtratu płuczki w przestrzeń porową skał.

Jeśli chodzi o płuczki zawierające w składzie tetratlenek trimanganu, to w dwóch przypadkach (płuczka H oraz I) filtracja przez próbki wyniosła zero, zarówno dla filtracji w warunkach dynamicznych, jak i statycznych, natomiast w przypadku płuczek L i M filtrację zmierzono dla jednej próbki poddanej oddziaływaniu ww. płuczkami (odpowiednio C74 i C9).

Na rysunkach 9 oraz 10 przedstawiono przykładowe próbki przed oddziaływaniem płuczki, po oddziaływaniu płuczki oraz po końcowym pomiarze przepuszczalności, a także zdjęcia RTG tych próbek.

Pomiar utraty przepuszczalności (uszkodzenia) próbek

W tabeli 5 oraz na rysunkach 11 i 12 zestawiono wyniki badań utraty przepuszczalności przebadanych próbek pod wpływem oddziaływania wytypowanych do badań płuczek wiertniczych.

W przypadku ponad połowy płuczek, to jest: A, B, F, G, H, K i M, utrata przepuszczalności badanych próbek o małej przepuszczalności początkowej (grupa I) była niższa niż utrata przepuszczalności próbek o dużej przepuszczalności (grupa II).

Analizując dane dotyczące wielkości filtracji, wielkości przepuszczalności początkowych i końcowych oraz utraty przepuszczalności badanych próbek można zauważyć następujące prawidłowości: spośród 11 próbek, dla których filtracja całkowita wyniosła zero (w ciągu 60 minut), 9 należało do grupy o niskiej przepuszczalności początkowej (do 3,4 mD), natomiast tylko 2 (C64 – płuczka H i C63 – płuczka I) do grupy o przepuszczalności wysokiej (powyżej 300 mD). Równocześnie można zauważyć trend, że zerowej filtracji całkowitej odpowiada wysoka wartość utraty przepuszczalności. Mianowicie utrata przepuszczalności ww. próbek wyniosła od około 45% do 75% dla 6 próbek (C20 – płuczka F, C16 i C63 – płuczka I, C30 – płuczka K, C19 – płuczka L, C41 – płuczka M), a od 20% do 40% dla 5 próbek (C27 – płuczka D, C22 – płuczka G, C25 i C64 – płuczka H, C17 – płuczka J).

Ponieważ grubość osadu filtracyjnego dla tych próbek była niewielka oraz brak było przepływu filtratu przez próbki, a zatem i głębokiego jego wnikania wraz z fazą stałą płuczki w przestrzeń porową próbek (głębokość inwazji ograniczona była do długości próbki, czyli 4–5 cm), oraz pomimo istnienia dużego uszkodzenia przepuszczalności (od 20% do 75%) wydawało się, że zastosowanie metod oczyszczania strefy przyodwiertowej (np. przemywanie roztworem na bazie kwasu) powinno dać dobre rezultaty przy przywracaniu przepuszczalności początkowej, zredukowanej przez zastosowane w badaniach płuczki wiertnicze. Ponadto osad filtracyjny powstały z płuczek na bazie tetratlenku trimanganu charakteryzował się dużą twardością, był zbity, a według literatury tetratlenek trimanganu jest dobrze rozpuszczalny w roztworach kwasu solnego. Postanowiono zatem sprawdzić, jak zmieni się uszkodzenie przepuszczalności po zastosowaniu „wanny” roztworu na bazie kwasu solnego. W tym celu wybrano dwie próbki, tj. C63 (759,3 mD, płuczka I) oraz C41 (3,33 mD, płuczka M). Dodatkowo postanowiono również zbadać oddziaływanie tego roztworu na próbki C20 (3,4 mD, płuczka F) oraz C30 (1,6 mD, płuczka K) poddane działaniu płuczek bez dodatku tetratlenku trimanganu.

Tabela 5. Zestawienie wyników badań utraty przepuszczalności próbek

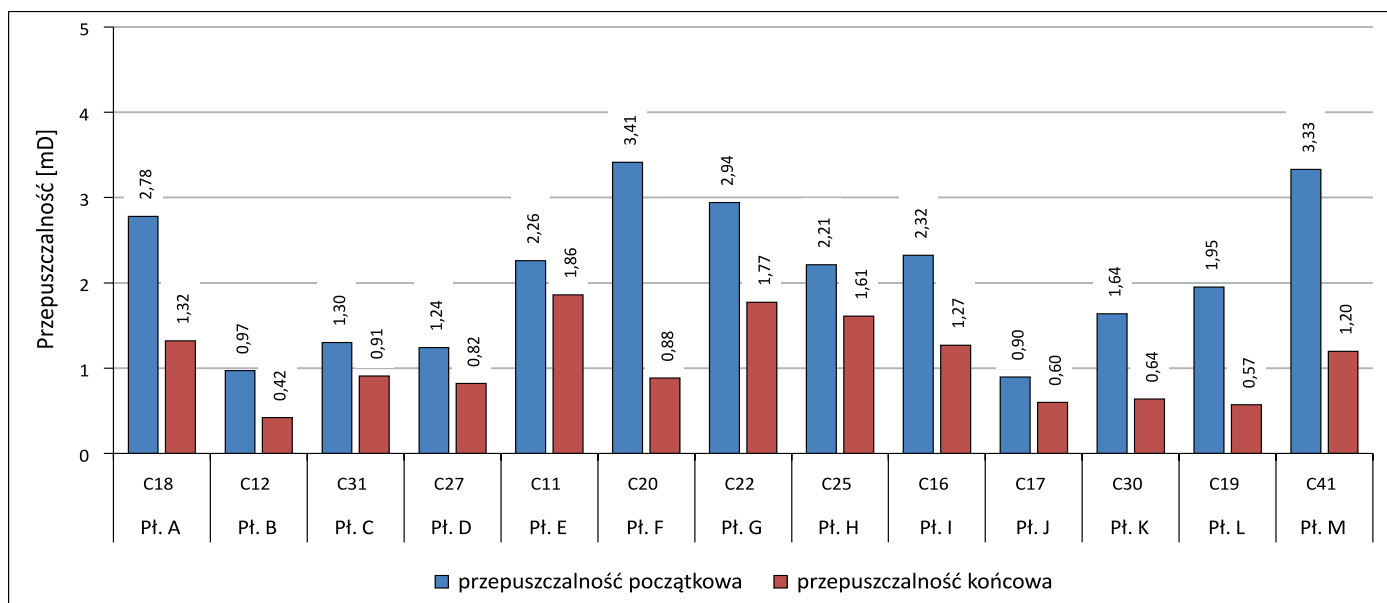
Table 5. Test results for loss of permeability of samples

Płuczka	Nr próbki	Przepuszczalność [mD]		Utrata przepuszczalności [%]	Grubość osadu filtracyjnego [mm]	
		przed płuczką	po płuczce		po płuczce	po końcowym pomiarze przepuszczalności
Płuczka A	C18	2,78	1,32	52,52	*	*
	C76	635,19	421,63	33,62	*	*

cd. Tabela 5/cont. Table 5

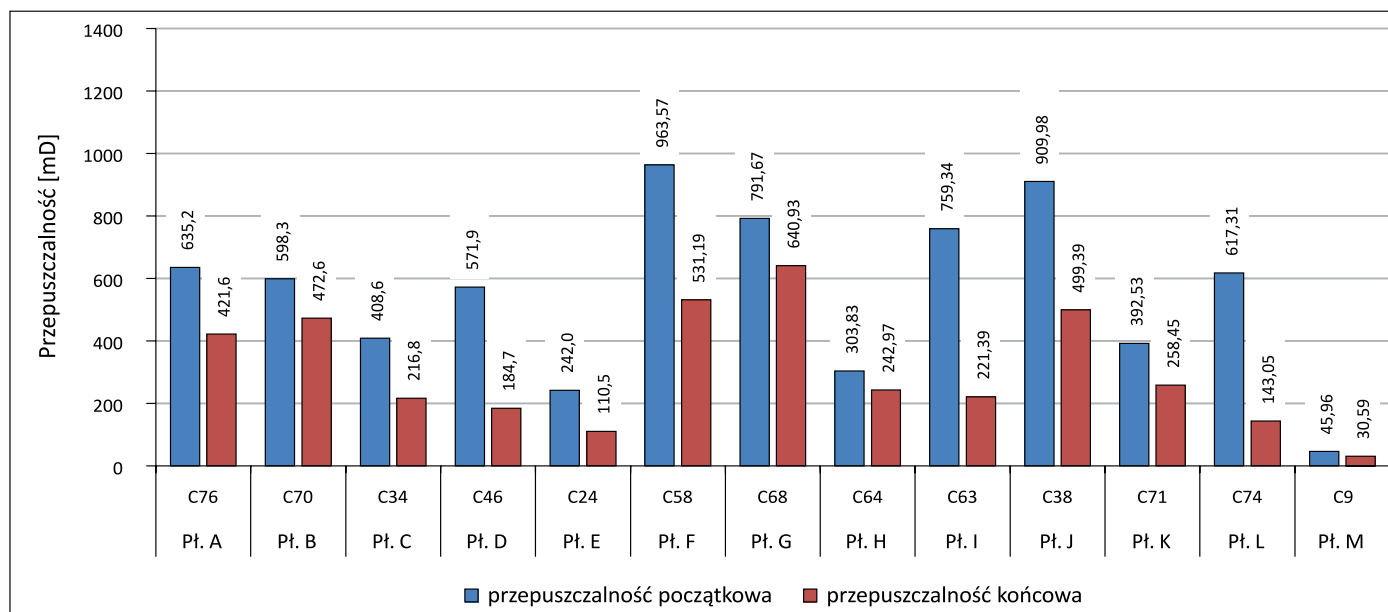
Płuczka	Nr próbki	Przepuszczalność [mD]		Utrata przepuszczalności [%]	Grubość osadu filtracyjnego [mm]	
		przed płuczka	po płuczce		po płuczce	po końcowym pomiarze przepuszczalności
Płuczka B	C12	0,97	0,42	56,70	*	*
	C70	598,30	472,61	21,01	*	*
Płuczka C	C31	1,30	0,91	30,00	0,4	
	C34	408,61	216,83	46,93	5,0	0,1
Płuczka D	C27	1,24	0,82	33,87	*	*
	C46	571,85	184,68	67,70	*	*
Płuczka E	C11	2,26	1,86	17,70	*	*
	C24	242,00	110,49	54,34	0,3	*
Płuczka F	C20	3,41	0,88	74,14	0,3	0,0
	C58	963,57	531,19	44,87	0,4	0,3
Płuczka G	C22	2,94	1,77	39,76	0,3	0,1
	C68	791,67	640,93	19,04	0,8	0,7
Płuczka H	C25	2,21	1,61	27,25	0,3	0,0
	C64	303,83	242,97	20,03	*	0,0
Płuczka I	C16	2,32	1,27	45,35	*	0,0
	C63	759,34	221,39	70,84	*	0,0
Płuczka J	C17	0,90	0,60	33,16	0,2	0,0
	C38	909,98	499,39	45,12	0,3	0,2
Płuczka K	C30	1,64	0,64	61,04	0,3	0,0
	C71	392,53	258,45	34,16	0,3	0,2
Płuczka L	C19	1,95	0,57	70,77	0,3	0,1
	C74	617,31	143,05	76,83	0,4	0,1
Płuczka M	C41	3,33	1,20	64,09	0,2	0,0
	C9	45,96	30,59	33,44	0,3	0,1

* Brak możliwości pomiaru grubości osadu zewnętrznego z użyciem RTG



Rysunek 11. Zestawienie wyników dla pierwszej grupy próbek (o niskiej przepuszczalności początkowej)

Figure 11. Results for the first group of samples (with low initial permeability)



Rysunek 12. Zestawienie wyników dla drugiej grupy próbek (o wysokiej przepuszczalności początkowej)

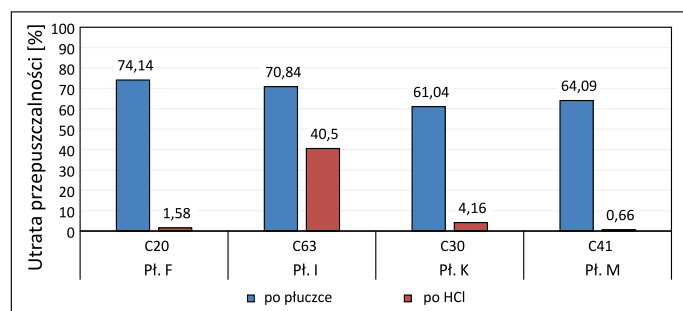
Figure 12. Results for the second group of samples (with high initial permeability)

W tabeli 6 i na rysunku 13 zestawiono wyniki pomiarów utraty przepuszczalności dla próbek C63 i C41 oraz C20 i C30.

Tabela 6. Zestawienie utraty przepuszczalności wybranych próbek po oddziaływaniu HCl

Table 6. Loss of permeability of selected samples after HCl treatment

Płuczka	Nr próbki	Przepuszczalność [mD]			Utrata przepuszczalności [%]	
		przed płuczka	po płuczce	po HCl	po płuczce	po HCl
F	C20	3,41	0,88	3,36	74,14	1,58
I	C63	759,34	221,39	451,80	70,84	40,50
K	C30	1,64	0,64	1,57	61,04	4,16
M	C41	3,33	1,20	3,31	64,09	0,66



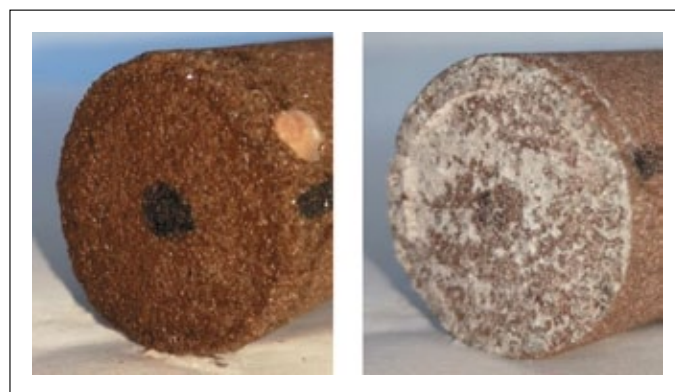
Rysunek 13. Zestawienie utraty przepuszczalności wybranych próbek po oddziaływaniu HCl

Figure 13. Loss of permeability of selected samples after HCl treatment



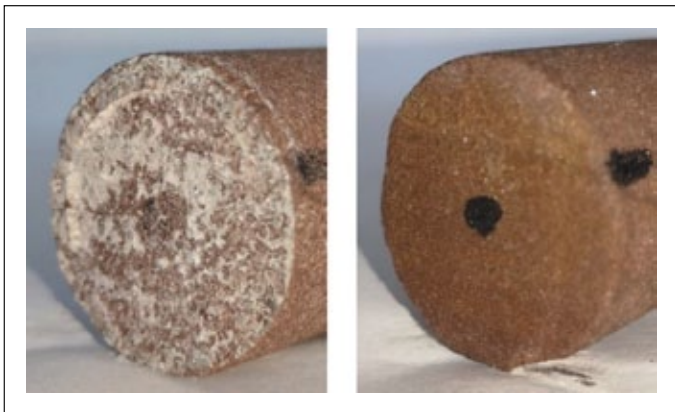
Rysunek 14. Próbką C20 po końcowym pomiarze przepuszczalności i po oddziaływaniu HCl

Figure 14. Sample C20 after final permeability measurement and treatment with HCl



Rysunek 15. Próbką C63 po końcowym pomiarze przepuszczalności i po oddziaływaniu HCl

Figure 15. Sample C63 after final permeability measurement and treatment with HCl



Rysunek 16. Próbką C30 po końcowym pomiarze przepuszczalności i po oddziaływaniu HCl

Figure 16. Sample C30 after final permeability measurement and treatment with HCl



Rysunek 17. Próbką C41 po końcowym pomiarze przepuszczalności i po oddziaływaniu HCl

Figure 17. Sample C41 after final permeability measurement and treatment with HCl

Na rysunkach 14–17 przedstawiono, w celach porównawczych, zdjęcia osadu filtracyjnego na czole wybranych próbek po końcowym pomiarze przepuszczalności oraz po oddziaływaniu HCl. Zastosowana kąpiel czoła rdzenia w roztworze na bazie 15-proc. HCl przywróciła praktycznie przepuszczalność początkową próbek o dużym uszkodzeniu zakolmatowanymi płuczkami z dodatkiem Mn_3O_4 . W przypadku próbki C63 (płuczka I) nie uzyskano takiego efektu. Należy przypuszczać, że faza stała płuczki wraz z polimerami wniknęła w przestrzeń porową w stopniu uniemożliwiającym jej usunięcie w normalnym procesie oczyszczania, jakim jest powrotny przepływ gazu (symulacja eksploatacji).

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że płuczki zawierające podwójne zestawy materiałów blokujących

o różnych wielkościach cząstek pozwalają na wytworzenie bardziej szczelnego osadu filtracyjnego uniemożliwiającego inwazję filtratu w skałę zbiornikową niż płuczki z jednym środkiem mostkującym. Szczególnie dobrze widać to na przykładzie badania filtracji przez rdzenie o niskiej przepuszczalności początkowej, kiedy to wszystkie badane płuczki z dwoma blokatorami miały zerową filtrację. Szczególnie dobre wyniki, zarówno filtracji API, jak i filtracji przez rdzeń, prezentują płuczki zawierające tetratlenek trimanganu wraz z blokatores węglanowym. Wydaje się, że tetratlenek trimanganu zastosowany jako blokator powinien spełniać swoje zadanie jako dobry środek zapobiegający inwazji fazy stałej i filtratu płuczki w przestrzeń porową skały. Szczelny osad filtracyjny co prawda powoduje znaczną utratę przepuszczalności, jednak zabiegi oczyszczania strefy przyodwiertowej powinny dać dobre rezultaty przy przywracaniu przepuszczalności początkowej.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można przedstawić następujące wnioski końcowe:

1. Nie wszystkie wyselekcjonowane w pierwszym etapie środki blokujące spełniały swoją rolę. Blokator węglanowy M1000 charakteryzował się dużo większymi rozmiarami cząstek od innych zastosowanych środków (około 65% ziaren mieściło się w zakresie 0,25–0,5 mm), co było przyczyną problemów z opracowaniem składu płuczki, w której środek ten nie ulegałby sedymentacji. Stąd współczynnik TSI mierzony dla płuczek zawierających M1000 zawsze był wysoki, a po przeprowadzonym badaniu na dnie naczynka widać było grubo osad sedymentacyjny. Duże wielkości ziaren tego materiału stawiają go raczej w roli środka do zapobiegania ucieczkom niż klasycznego materiału ograniczającego uszkodzenie strefy przyodwiertowej.
2. Najbardziej efektywnym środkiem w kontekście ograniczenia filtracji API płuczki był tetratlenek trimanganu. Przy stężeniu 5,0% tego środka w płuczce wartość filtracji wynosiła 4,8 cm^3 . Z kolei najwyższą filtracją spośród płuczek obrobionych pojedynczym blokatores charakteryzowała się ta zmodyfikowana środkiem Thru carb – 14,6 cm^3 .
3. Badania filtracji przez próbki rdzeni wykazały, że duże znaczenie dla uzyskanych wyników filtracji ma przepuszczalność próbek rdzeni. Filtracja przez próbki o przepuszczalnościach poniżej 3,4 mD była zdecydowanie niższa – filtracja całkowita nie przekroczyła wartości 1,6 $cm^3/60$ minut, a dla dziewięciu próbek wyniosła zero. Odmiennie wyglądała sytuacja w przypadku próbek o przepuszczalności rzędu kilkudziesięciu lub kilkuset mD, wśród których tylko w dwóch przypadkach filtracja całkowita była zerowa.
4. Spośród płuczek o podwójnym zestawie blokatores zdecydowanie najlepsze rezultaty w ograniczaniu filtracji przez rdzeń uzyskano dla płuczek H oraz I. W obu przypadkach środkami blokującymi były tetratlenek trimanganu i blokator

- węglanowy M25. Dla płuczek tych otrzymano zerową filtrację zarówno w warunkach dynamicznych, jak i statycznych przez rdzenie o niskiej i wysokiej przepuszczalności.
- Po dokonaniu pomiarów grubości zewnętrznego osadu filtracyjnego, który utworzył się na czołach próbek rdzeni podczas procesu kolmatacji, czyli oddziaływania na próbki poszczególnymi płuczkami, można stwierdzić, że zmierzone (w przypadkach, w których było to możliwe) grubości osadu były nieznaczne i mieściły się w zakresie od 0,2 mm do 0,8 mm. Jedynie próbka C34 (płuczka C), dla której zarejestrowano również największą wielkość filtracji całkowitej (72 cm³/60 min), posiadała bardzo grubo osad filtracyjny – około 5,0 mm.
 - Badanie na przepuszczalnościomierzu wykazało, że utrata przepuszczalności mieściła się w bardzo szerokim zakresie zarówno dla grupy rdzeni o niskiej przepuszczalności początkowej (utrata od 17,7% do 74,1%), jak i wysokiej przepuszczalności początkowej (utrata od 19% do 77%). Bardzo widoczny był trend, że próbkom, w przypadku których odnotowano zerową filtrację całkowitą, odpowiadała wysoka wartość utraty przepuszczalności. Jednocześnie grubość osadu filtracyjnego dla tych próbek była niewielka oraz brak było przepływu filtratu przez próbki, a zatem i głębokiego jego wnikania w przestrzeń porową próbek. Na podstawie tych wyników można było przypuszczać, że zastosowanie przemywania roztworem kwasu bądź innych metod oczyszczania strefy przyodwiertowej może dać dobre rezultaty przy przywracaniu przepuszczalności początkowej.
 - Zabieg usuwania osadu filtracyjnego przy użyciu roztworu na bazie 15-proc. HCl praktycznie przywrócił przepuszczalność początkową w trzech z czterech badanych próbek. Na podstawie powyższych obserwacji można przypuszczać, że zabiegi udrażniania strefy przyodwiertowej pozwolą w przypadku przebadanych płuczek przywrócić początkową przepuszczalność strefy przyodwiertowej, a przez to nie zaburzyć procesu eksploatacji gazu ze złoża. Należy przy tym zaznaczyć, że zastosowanie roztworu kwasu solnego było wystarczające w warunkach laboratoryjnych, natomiast zabieg kwasowania w warunkach przemysłowych jest o wiele bardziej złożony i wymaga zastosowania cieczy kwasującej o składzie dobranym do panujących warunków, odpowiednich inhibitorów korozji itp.
- Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Dobór materiałów blokujących do tymczasowego uszczelnienia strefy przyodwiertowej*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0095/KW/2021, nr archiwalny: DK-4100-0083/2021.
- ### Literatura
- Abdo J., Haneef M.D., 2012. Nano-enhanced drilling fluids: Pioneering approach to overcome uncompromising drilling problems. *Journal of Energy Resources Technology*, 134(1): 014501. DOI: 10.1115/1.4005244.
- Abdo J., Haneef M.D., 2016. Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells. *Applied Clay Science*, 86: 76–82. DOI: 10.1016/j.clay.2013.10.017.
- Abrams A., 1977. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion. *J. Pet. Technol.*, 29(05): 586–592. DOI: 10.2118/5713-PA.
- Adel M., Ragab S., Noah A., 2014. Reduction of formation damage and fluid loss using nano-sized silica drilling fluids. *Petroleum Technology Development Journal: An International Journal*, 7(2): 75–88.
- Al Moajil A.M., Nasr-El-Din H.A., 2013. Removal of manganese tetraoxide filter cake using a combination of HCl and organic acid. *Paper presented at the SPE Heavy Oil Conference-Canada, Calgary, Alberta, Canada, June 2013*. DOI: 10.2118/165551-MS.
- Al-Bagoury M., Steele Ch., 2012. A new, alternative weighting material for drilling fluids. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego, California, USA*. DOI: 10.2118/151331-MS.
- Alrasheed A., Oqaili A.H., Aljubran M.J., Ezi P.C., 2018. Deployment of fully automated MPD and manganese tetroxide mud system to drill ultra-narrow mud window in HPHT gas wells. *Paper presented at the SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, April 2018*. DOI: 10.2118/190000-MS.
- Alvarez L.A., Cedeno M.D., Villon P.V., Pinoargote R.C., 2019. Design of a fluid for workover operations in the Gustavo Galindo Oilfield, Ecuador. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(11): 2118-2124.
- Al-Yami A.S., Nasr-El-Din H., Bataweel M.A., Al-Majed A.A., Menouar H., 2008. Formation damage induced by various water-based fluids used to drill HP/HT wells. *Petroleum Engineering*, 30: 471–500. DOI: 10.2118/112421-MS.
- Baron V., Gutzmer J., Rundlöf H., Tellgren R., 1998. The influence of iron substitution on the magnetic properties of hausmannite, Mn²⁺(Fe,Mn)³⁺₂O₄. *American Mineralogist*, 83: 786–793. DOI: 10.2138/am-1998-7-810.
- BDC Group. <<http://bdc.com.pl>> (dostęp: luty 2021).
- Błaż S., 2010. Nowa generacja płuczek do przewiercania reaktywnych skał ilastych. *Nafta-Gaz*, 66(5): 390–398.
- Caenn R., Darley H.C.H., Gray G.R., 2011. Composition and properties of drilling and completion fluids. Sixth Edition. *Gulf Professional Publishing*.
- Contreras O., Hareland G., Husein M., Nygaard R., Al-Saba M., 2014. Application of in-house prepared nanoparticles as filtration control additive to reduce formation damage. *Paper presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, February 2014*. DOI: 10.2118/168116-MS.
- Dębińska E., 2014. Wpływ nanokrzemionki na parametry mechaniczne kamienia cementowego. *Nafta-Gaz*, 70(4): 229–235.
- Dębińska E., 2015. Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki. *Nafta-Gaz*, 71(5): 290–300.
- Dick M.A., Heinz T.J., Svoboda C.F., Aston M., 2000. Optimizing the selection of bridging particles for reservoir drilling fluids. *SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/58793-MS.
- Herman Z., Pólchłopek T., 1996. Wpływ kationów nieorganicznych na przepuszczalność piaskowcowych skał zbiornikowych. Badania laboratoryjne. *Archiwum Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków*.
- Ismail N.I., Lawrence E., Naz M.Y., Shukrullah S., Sulaiman S.A., 2021. Role of particle size distribution of bridging agent for

- drilling mud on formation damage near wellbore. *Materials Today: Proceedings*, 47: 13–17. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.371.
- Jankiewicz B.J., Choma J., Jamiola D., Jaroniec M., 2010. Nanostruktury krzemionkowo-metaliczne. Otrzymywanie i modyfikacja nanocząstek krzemionkowych. *Wiadomości Chemiczne*, 64: 913–942.
- Jasiński B., 2018. Określenie dynamicznej filtracji płuczek wiertniczych w warunkach HPHT z użyciem nowatorskiej metody pomiarowej. *Nafta-Gaz*, 74(2): 85–95. DOI: 10.18668/NG.2018.02.02.
- Liu X., Civan F., 1996. Formation damage by fines migration including effects of filter cake, pore compressibility, and non-darcy flow – a modeling approach to scaling from core to field. *Paper presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, San Antonio, Texas, February 1995*. DOI: 10.2118/25215-PA.
- Mungan N., 1965. Permeability reduction through changes in pH and salinity. *J. Pet. Technol.* 17(12): 1449–1453. DOI: 10.2118/1283-PA.
- Oort E. van, 2003. On the physical and chemical stability of shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38: 213–235. DOI: 10.1016/S0920-4105(03)00034-2.
- Ponmani S., Nagarajan R., Sangwai J.S., 2016. Effect of nanofluids of CuO and ZnO in polyethylene glycol and polyvinylpyrrolidone on the thermal, electrical, and filtration-loss properties of water-based drilling fluids. *SPE Journal*, 21(02): 405–415. DOI: 10.2118/178919-PA.
- PSPW <<http://www.pspw-krosno.com.pl>> (dostęp: marzec 2021).
- Raczkowski J., Pólichłopek T., 1998. Materiały i środki chemiczne do sporządzania płuczek wiertniczych. *Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa*, 95: 1–319.
- Rahman S.S., Rahman M.M., Khan F.A., 1995. Response of low-permeability, illitic sand-stone to drilling and completion fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 12: 309–322. DOI: 10.1016/0920-4105(94)00052-6.
- Salih A.H., Bilgesu H., 2017. Investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids using various anionic nanoparticles. *Paper presented at the SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, April 2017*. DOI: 10.2118/185638-MS.
- Salih A.H., Elshehabi T.A., Bilgesu H.I., 2016. Impact of nanomaterials on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluids. *SPE Eastern Regional Meeting, Canton, Ohio, USA*. DOI: 10.2118/184067-MS.
- Schlumberger Oilfield Glossary. <<http://www.glossary.oilfield.slb.com>> (dostęp: luty 2021).
- Sindi R., Pino R., Gadalla A., Sharma S., 2019. Achievement of maximum mud weights in WBM with Micromax/Barite blend and its successful implementation in deep HPHT Challenging Environment. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE*. DOI: 10.2118/197594-MS.
- Stec M., 2017. Opracowanie nowych receptur płuczek mrowczanowych w aspekcie ograniczenia uszkodzenia strefy przyodwiertowej. *Rozprawa doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica, Kraków*.
- Uliasz M., 2020. Rola związków glinu w stabilizowaniu skał ilasto-lupkowych. *Nafta-Gaz*, 76(1): 29–36. DOI: 10.18668/NG.2020.01.04.
- Uliasz M., 2021. Ciecze robocze – ich właściwości technologiczne i rola w procesie rekonstrukcji odwiertów. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 235: 1–160. DOI: 10.18668/PN2021.235.
- Uliasz M., Herman Z., 2007. Wymagania i właściwości cieczy roboczych. Materiały konferencyjne. *Konferencja z okazji 20-lecia Instytutu Problemów Nafty i Gazu Rosyjskiej Akademii Nauk. Moskwa*.
- Uliasz M., Herman Z., 2008. Wymagane parametry cieczy roboczych dla ochrony pierwotnych właściwości skał zbiornikowych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 25(2): 753–764.
- Zhang F., Yan J., Li Z., 2009. Study on the workover fluid formula and performance of the prevention reservoir. *Modern Applied Science*, 3(12): 9–13. DOI: 10.5539/MAS.V3N12P9.
- Zima G., 2017. Analiza wpływu nanomateriałów na właściwości osadu filtracyjnego. *Nafta-Gaz*, 73(5): 312–320. DOI: 10.18668/NG.2017.05.03.
- Zima G., Uliasz M., Błaż S., Jasiński B., Wiśniowski R., Wysocki S., 2017. Nowe rodzaje inhibitorów i ich wpływ na właściwości hydratacyjne skał ilasto-lupkowych. *Nafta-Gaz*, 73(1): 36–42. DOI: 10.18668/NG.2017.01.04.



Mgr inż. Paweł BUDAK
Starszy specjalista badawczo-techniczny, kierownik Zakładu Inżynierii Naftowej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: pawel.budak@inig.pl



Mgr inż. Marcin MAJKRZAK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Inżynierii Naftowej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marcin.majkrzak@inig.pl



Mgr inż. Łukasz KŁYŻ
Specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie Inżynierii Naftowej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: lukasz.klyz@inig.pl



Mgr inż. Bartłomiej JASIŃSKI
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bartlomiej.jasinski@inig.pl



Dr inż. Małgorzata ULIASZ
Kierownik Zakładu Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: malgorzata.uliasz@inig.pl