

Mateusz Maślowski

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Badania przewodności warstwy materiału podsadzkowego dla gazu (azotu) po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

W artykule została przedstawiona tematyka związana z technologią tworzenia szczelin oraz z uszkodzeniem przewodności warstwy materiału podsadzkowego po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych. Opisano również metodykę badania przewodności warstwy podsadzki uszkodzonej przez płyn szczelinujący dla zawilgoconego gazu (azotu). Badania wykonano z wykorzystaniem podsadzki kwarcowej oraz płynu szczelinującego, charakterystycznych dla technologii *slickwater fracturing*, stosowanej do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych typu łupkowego. Podsadzka była umieszczona pomiędzy dwiema kształtkami skalnymi. Wyniki badań mogą stanowić podstawę do opracowania wstępnej oceny przewodności warstwy materiału podsadzkowego dla zawilgoconego gazu (azotu) po wykonaniu zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów.

Słowa kluczowe: materiał podsadzkowy, przewodność podsadzki, uszkodzenie przewodności podsadzki, płyn szczelinujący, zabiegi hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych.

Studies of the conductivity of proppant material for the wet gas (nitrogen) after the hydraulic fracturing treatment of unconventional reservoirs

This article presents, the subjects related to technology used for creating fractures in rock and damage to proppant conductivity fluid fracturing, after hydraulic fracturing in unconventional deposits. Methodology studies of proppant conductivity damage by wet nitrogen, was developed. The tests were performed for the quartz proppant and the slickwater fracturing, which are used for the hydraulic fracturing of unconventional reservoirs, including fracturing in shales. Proppant was placed between two rock slabs. Based on obtained data, a preliminary method for the evaluation of proppant conductivity for wet gas after hydraulic fracturing treatments can be developed.

Key words: proppant material, proppant conductivity, proppant conductivity damage, fracturing fluid, hydraulic fracturing in unconventional reservoirs.

Wstęp

Wydobycie węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych jest stosunkowo nową gałęzią przemysłu naftowego. Złóża niekonwencjonalne to między innymi złoża typu zamkniętego (ang. *tight gas*) oraz formacje łupkowe (ang. *shale gas*) [5, 6, 12, 13, 15, 16, 17, 20]. Złóża typu zamkniętego charakteryzują się małą przepuszczalnością i porowatością. Ich przepuszczalność dla gazu wynosi nie więcej niż 0,1 mD [12, 13, 15, 16]. W skałach tych podstawowym składnikiem budującym matrycę

skalną jest kwarc. Złóża typu łupkowego cechuje matryca o bardzo niskiej porowatości oraz przepuszczalności (w niektórych przypadkach poniżej 0,001 mD). W łupkach podstawowym składnikiem budującym matrycę skalną są minerały nieilaste – głównie kwarc (60÷70%), duża jest także zawartość minerałów ilastych – przede wszystkim illitu (30÷40%) [12, 13, 15, 16]. Do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych stosuje się: roztwory naturalnych lub syntetycznych

polimerów liniowych, piany, sam sieciowany żel polimerowy lub zabiegi hybrydowe [3, 4–8, 12, 13, 15–20]. Aby zabiegi stymulacyjne w formacjach łupkowych były skuteczne, należy wytworzyć w nich system licznych szczelin, mikropeknięć umożliwiających uwolnienie się zaadsorbowanego gazu oraz przepływ węglowodorów z sieci porów do odwiertu [4, 5, 8,

12, 13, 17, 18]. Podczas zabiegu hydraulicznego szczelinowania przewodność warstwy podsadzki zostaje uszkodzona przez płyn szczelinujący. Dlatego też przy wyborze technologii do wykonania zabiegu szczelinowania konkretnego złoża przydatne jest określenie przewodności warstwy podsadzki uszkodzonej przez główny płyn szczelinujący.

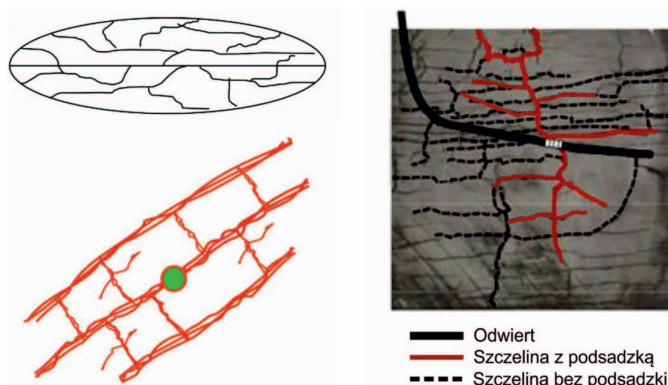
Technologia *slickwater fracturing* do tworzenia szczelin podczas zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych typu łupkowego

Do hydraulicznego szczelinowania złóż gazowych typu łupkowego charakteryzujących się niskim stopniem plastyczności (tzw. łupek kruchy) wykorzystuje się najczęściej tzw. technologię *slickwater fracturing*. Do charakterystycznych cech wyróżniających tę technologię należą [8, 17]:

- minimalizacja uszkodzenia szczelin i matrycy, w związku z minimalną zawartością polimeru,
- duże ilości cieczy technologicznej do wykonania zabiegu,
- stosunkowo niskie koszty cieczy,
- konieczność stosowania bardzo dużych wydajności tłoczenia,
- dobra kontaminacja szczeliny w stymulowanym horyzoncie,
- bardzo złożona geometria szczelin,
- możliwość wielokrotnego użycia cieczy technologicznej,
- wysoka filtracja w matrycę i mikroszczeliny,
- ograniczone właściwości transportowe podsadzki,
- bardzo mała rozwarstość wytworzonych szczelin,
- stosowanie materiałów podsadzkowych o małych rozmiarach,
- brak możliwości wykorzystywania klasycznych modeli propagacji szczeliny (PKN) i symulatorów do projektowania zabiegów,
- szybkie zamknięcie szczeliny po zabiegu,
- brak tzw. placka filtracyjnego (ang. *filter cake*).

W technologii *slickwater fracturing* najczęściej stosuje się płyny na bazie wodnych roztworów syntetycznych polimerów liniowych (w ilości nie przekraczającej 1 l/m³) oraz naturalnych polimerów liniowych (w stężeniu w zakresie 0,6÷1,2 kg/m³). Współczynnik lepkości dynamicznej głównego płynu szczelinującego jest rzędu kilku bądź kilkunastu mPa · s [3, 4, 5, 13, 15, 14, 17, 18]. Zadaniem płynu szczelinującego zatłaczanego do odwiertu pod ciśnieniem wyższym od ciśnienia szczelinowania złoża jest otwarcie i propagacja szczeliny oraz transport do niej materiału podsadzkowego. Jako materiał podsadzkowy najczęściej wykorzystywany jest piasek kwarcowy o rozmiarze ziaren rzędu 425÷212 μm (40÷70 mesh) lub 600÷300 μm (30÷50 mesh) [7, 12–15]. W przypadku występowania wysokich temperatur oraz ciśnień złożowych zaleca się stosowanie piasku kwarcowego

dotychczas pokrytego powłoką z żywicy (RCS – ang. *resin-coated sand*) lub lekkiej podsadzki ceramicznej (LCP – ang. *light ceramic proppants*). Zadaniem podsadzki jest podtrzymanie rozwarstości wytworzonej szczeliny, a tym samym umożliwienie przepływu gazu ze złoża do odwiertu. W jednym odwiercie wykonuje się kilka zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Podczas takich zabiegów do złoża zatłaczana jest duża ilość płynu szczelinującego (tysiące m³) oraz materiału podsadzkowego (setki ton). Płyn zatłacza się z dużą wydajnością, dochodzącą nawet do 25 m³/min, natomiast średnia koncentracja podsadzki w płynie jest rzędu 120 kg/m³, a maksymalnie nie przekracza 359 kg/m³ [4]. Odgrywa to ważną rolę w rozwoju sieci szczelin wystarczająco rozległych, aby objąć jak największą objętość skały i połączyć je z odwiertem w procesie hydraulicznego szczelinowania. Geometria utworzonych szczelin w formacjach łupkowych jest bardzo złożona i zależy od obszarów zdolnych do pęknięcia, co przedstawiono na rysunku 1 [3, 4, 5, 11, 15].

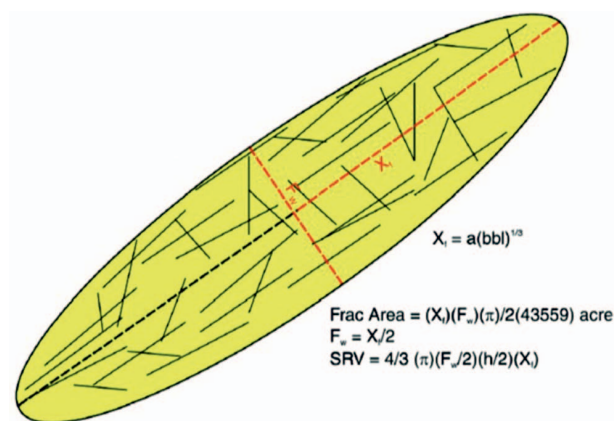


Rys. 1. Wizualizacja geometrii licznych szczelin i mikroszczelin umożliwiających uwolnienie się zaadsorbowanego gazu w formacjach łupkowych o dużej zdolności do szczelinowania oraz przepływ węglowodorów ze złoża do odwiertu [3, 4, 5, 11, 15]

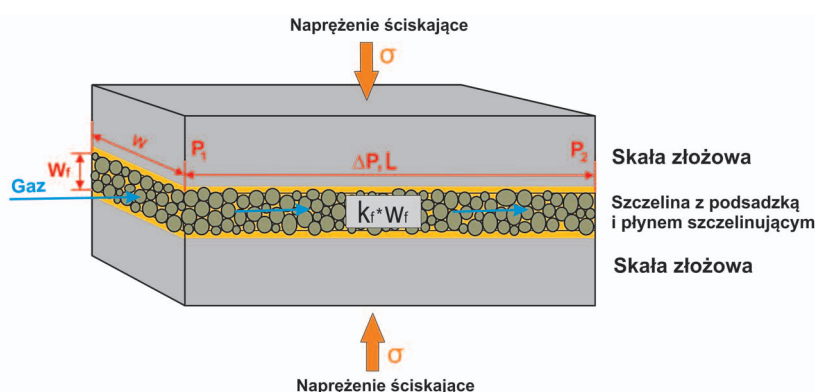
Przykładem powstawania sieci bardzo wielu szczelin o niewielkiej rozwarstości i dużym zasięgu, umożliwiającym kontakt z naturalnymi mikroszczelinami, jest mikro-sejsmiczna interpretacja geometrii szczelin dla złoża Barnett Shale [3, 4, 8, 15, 17]. Mikro-sejsmiczne przedstawienie

rozkładu szczelin pozwala określić parametry szczelinowania, w tym wysokości, długości i azymutu, a także złożoności SRV (*stimulation reservoir volume – objętość złoża objęta procesem stymulacji*) i spękań. SRV pokazuje bezpośredni kontakt możliwego do wydobycia gazu z odwiertem. Sposób określenia przeciętnego wymiaru SRV dla typowego szczelinowania łupków na złożu Barnett Shale przy użyciu bardzo dużej ilości płynu szczelinującego *slickwater* za prezentowano na rysunku 2 [3, 15, 17].

Na przewodność wytworzonych podczas zabiegu szczelin wpływa także płyn szczelinujący, co przedstawiono na rysunku 3 [17].



Rys. 2. Wyznaczenie średniego wymiaru SRV dla typowego szczelinowania łupków za pomocą technologii *slickwater* na złożu Barnett [3, 15, 17]



Rys. 3. Wizualizacja uszkodzenia przewodności warstwy podsadzki przez płyn szczelinujący po wykonaniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów [17]

Metodyka badania przewodności warstwy podsadzki uszkodzonej przez płyn szczelinujący dla gazu (azotu) po przeprowadzeniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów

Celem prawidłowego wykonania laboratoryjnej symulacji uszkodzenia przewodności warstwy podsadzki przez płyn szczelinujący oraz analizy uzyskanych wyników należy zgromadzić opisane poniżej dane:

Charakterystyka warunków złożowych oraz technologii wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża [1, 12, 16, 17]

W tym celu należy zebrać informacje odnośnie do: głębokości odwiertu, temperatury złożowej, wartości ciśnień i naprężeń panujących w złożu (ciśnienie zamknięcia szczeliny), szybkości zaciskania się szczeliny w warunkach złożowych, rodzaju płynów złożowych, rodzaju materiału podsadzkowego, koncentracji materiału podsadzkowego, rodzaju płynów zastosowanych do zabiegu szczelinowania.

Właściwości skały użytej do badań [1, 12, 17, 20]

Do właściwości skały złożowej zaliczane są między innymi skład mineralogiczny skały złożowej, współczynnik przepuszczalności dla gazu, współczynnik porowatości oraz jej właściwości mechaniczne (statyczny i dynamiczny moduł Younga oraz współczynnik Poissona).

Właściwości reologiczne płynu szczelinującego [2, 6, 9, 10, 17]

Płyny szczelinujące posiadają nienewtonowską charakterystykę reologiczną. Do określenia ich współczynnika lepkości dynamicznej wykorzystuje się model potęgowy (tzw. *power law model*) uwzględniający pomiar na danym urządzeniu współczynników n' i K' . Lepkość pozorną płynów nienewtonowskich wyznacza się na podstawie następującego równania [2, 6, 9, 10, 17]:

$$\mu = K' \cdot \dot{\gamma}^{(n'-1)} \quad (1)$$

gdzie:

μ – lepkość dynamiczna [Pa · s],

$\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania [s^{-1}],

n' – współczynnik potęgowy [–] (miara odchylenia od płynu newtonowskiego),

K' – współczynnik konsystencji [Pa · s $^{n'}$].

Wyznaczenie podstawowych właściwości materiału podsadzkowego [13, 14, 17, 22, 23, 25]

Podstawowe badania mają na celu stwierdzenie, czy badany materiał podsadzkowy może być stosowany jako *proppant*

do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż. Wykonuje się je zgodnie ze szczegółowo opisanymi procedurami pomiarowymi zawartymi w normach [22, 23, 25].

Przygotowanie kształtek skalnych do badań [17, 24, 26]

Próbki skały użyte do badań powinny pochodzić ze skały złożowej odpowiadającej głębokości wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania. Ze względu na wysokie koszty oraz trudności związane z dostępnością tego typu próbek dopuszcza się stosowanie rdzeni charakteryzujących się właściwościami zbliżonymi do skały złożowej. Ze skały wycina się kształtki skalne o wymiarach: długość 17,70÷17,78 cm, szerokość 3,71÷3,81 cm, grubość co najmniej 0,9 cm, o powierzchni przekroju 64,52 cm², tj. 10 in².

Wyznaczenie przewodności i przepuszczalności warstwy podsadzki dla gazu (azotu) po zabiegu szczelinowania [17, 21]

Pomiar ciśnienia absolutnego na początku i na końcu szczeliny oraz spadku ciśnienia na odcinku pomiarowym o długości L wykonuje się dla kilku różnych wielkości wydatku przepływającego gazu (azotu) przez warstwę podsadzki.

Gdy przepływ gazu przez szczelinę wypełnioną podsadzką następuje ze stosunkowo dużą prędkością, zachodzi potrzeba uwzględnienia odstępstw od prawa Darcy'ego. W takim przypadku przepuszczalność oraz przewodność szczeliny dla gazu opisane są równaniem Forchheimera (równanie 2), wprowadzającym współczynnik oporu przepływu turbulentnego (burzliwego) β [17, 21]:

$$\frac{(P_1^2 - P_2^2) \cdot M \cdot h}{2 \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot L \cdot \mu \cdot \rho \cdot Q} = \frac{\beta \cdot \rho \cdot Q}{W_f^2 \cdot \mu \cdot h} + \frac{1}{k_f \cdot W_f} \quad (2)$$

gdzie:

- P_1 – ciśnienie absolutne na początku odcinka pomiarowego [Pa],
- P_2 – ciśnienie absolutne na końcu odcinka pomiarowego [Pa],
- T – temperatura przepływającego gazu (azotu) [K],
- Q – wydatek przepływu gazu (azotu) [m³/s],
- k_f – przepuszczalność szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym i płynem szczelinującym [$10^{-12} \cdot \text{m}^2$],
- W_f – szerokość (rozwartość) szczeliny wypełnionej podsadzką i płynem szczelinującym [m],
- h – wysokość szczeliny (tj. szerokość otworu wlotowego komory API, $w = 3,810$ cm, tj. 1,5") [m],
- L – długość odcinka pomiarowego między otworami ciśnieniowymi [m],
- M – masa molowa gazu (azotu) [kg/mol],
- Z – współczynnik ściśliwości gazu (azotu) [-],
- R – uniwersalna stała gazowa [J/mol · K],
- ρ – gęstość gazu (azotu) [kg/m³],

μ – lepkość gazu (azotu) [Pa · s],

β – współczynnik oporu przepływu turbulentnego [1/m].

Gęstość gazu (azotu) wyznacza się według równania stanu gazu doskonałego, równanie (3) [17]:

$$\rho = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T} \quad (3)$$

gdzie:

ρ – gęstość gazu (azotu) [kg/m³],

P – ciśnienie gazu (azotu) [Pa],

M – masa molowa gazu (azotu) [kg/mol],

Z – współczynnik ściśliwości gazu (azotu) [-],

R – uniwersalna stała gazowa, 8,3144 [J/K · mol],

T – temperatura gazu (azotu) [K].

Współczynnik lepkości dynamicznej gazu (azotu) wyznacza się według równania (4) [17]:

$$\mu = \frac{-0,000066 \cdot T^2 + 0,251493 \cdot T + 157,982967}{10000} \quad (4)$$

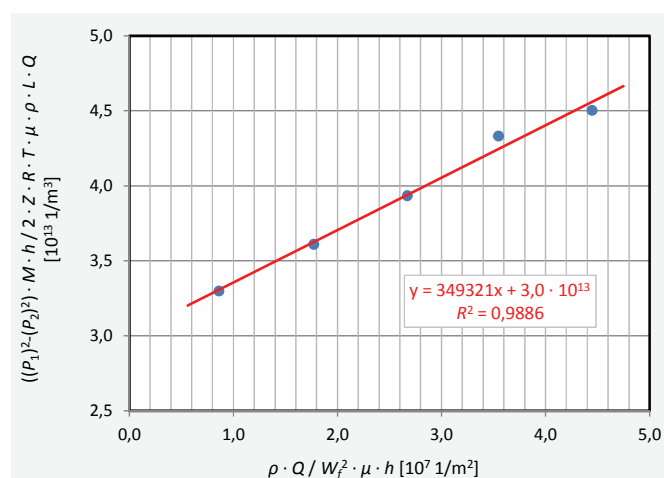
gdzie:

μ – lepkość dynamiczna gazu (azotu) [10^{-3} Pa · s],

T – temperatura gazu (azotu) [°F].

W celu wyznaczenia przepuszczalności k_f oraz przewodności $k_f \cdot W_f$ warstwy podsadzki dla gazu (azotu) według równania (2) wykorzystuje się równanie linii prostej $y = ax + b$, gdzie wartością osi x jest $\frac{\rho \cdot Q}{W_f^2 \cdot \mu \cdot h}$, natomiast

$\frac{(P_1^2 - P_2^2) \cdot M \cdot h}{2 \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot L \cdot \mu \cdot \rho \cdot Q}$ jest wartością osi y , odpowiadającą równaniu Forchheimera [17, 21].



Rys. 4. Przykładowe dopasowanie linii prostej do wyznaczenia przewodności i przepuszczalności uszkodzonej warstwy podsadzki przez płyn szczelinujący w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu równania Forchheimera

Przecięcie linii prostej z osią y odpowiada odwrotności przewodności warstwy podsadzki [17]. Rysunek 4 przedstawia przykładowe dopasowanie linii prostej dla uzyskanych wyników z badań przewodności przy zastosowaniu równania Forcheimera (równanie 2) [17].

Laboratoryjna symulacja zjawiska uszkodzenia przewodności warstwy podsadzki przez płyn szczelinujący

W celu laboratoryjnego zasymulowania zjawiska uszkodzenia przewodności warstwy podsadzki przez płyn szczelinujący należy wytworzyć szczelinę wypełnioną podsadzką, a następnie poddać ją działaniu zadanego naprężenia ściskającego. Masę materiału podsadzkowego potrzebną do wypełnienia szczeliny i uzyskania odpowiedniej koncentracji powierzchniowej określa się według równania (5) [15, 17, 24, 26]:

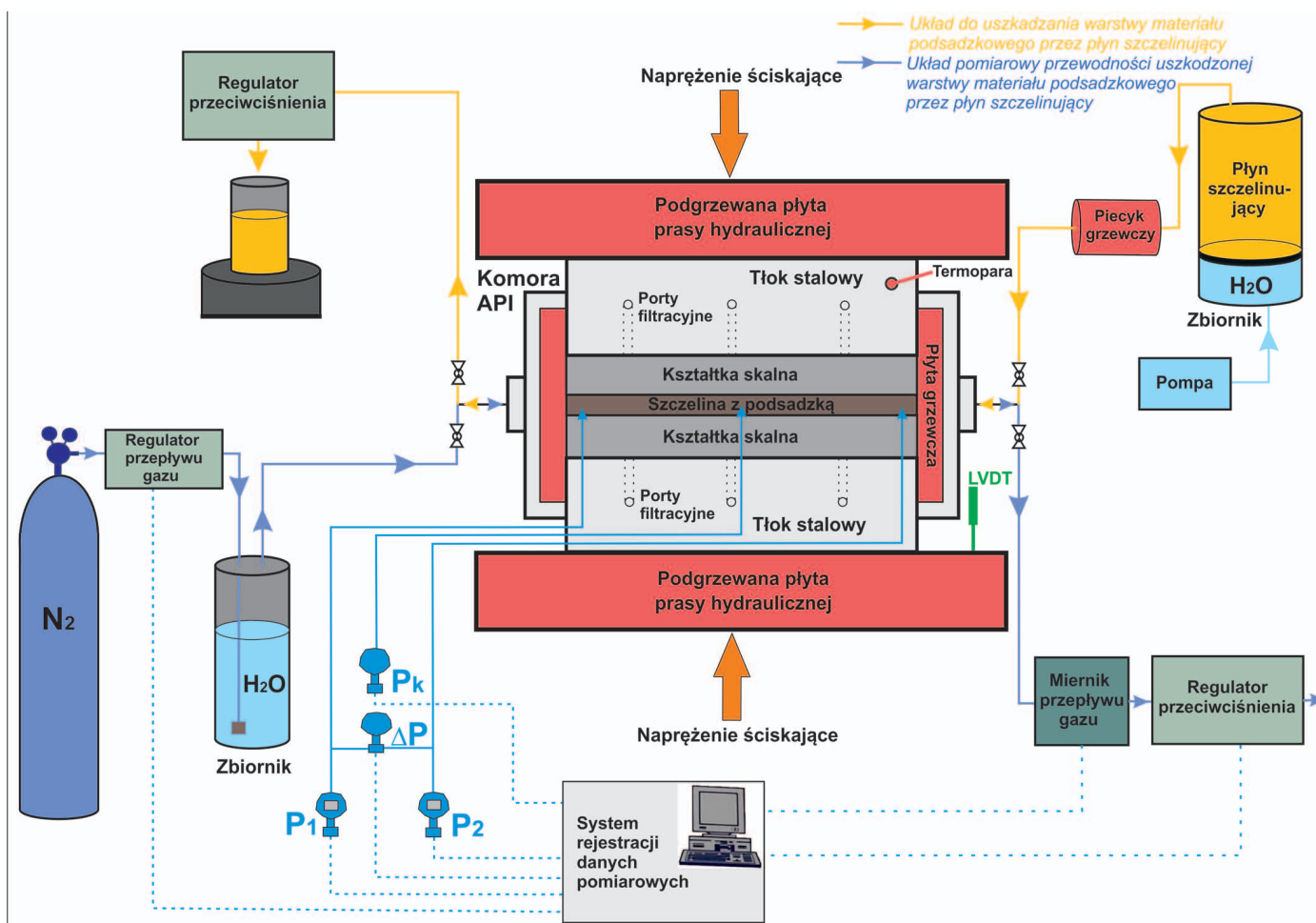
$$m_p = 6,452 \cdot C \quad (5)$$

gdzie:

m_p – masa materiału podsadzkowego [g],

C – obciążenie wywierane przez materiał podsadzkowy (tj. koncentracja powierzchniowa podsadzki) [kg/m^2].

Następnie odważony materiał podsadzkowy umieszcza się wewnątrz komory pomiędzy dwiema kształtkami skalnymi. Tak przygotowaną komorę zamyka się powoli tłokami, a następnie umieszcza się na prasie hydraulicznej i podgrzewa się do zadanej temperatury badania [17]. Po uzyskaniu stałej temperatury w komorze – podłącza się układ do uszkodzania warstwy podsadzki (rysunek 5) i przetłacza się przez nią założoną ilość płynu szczelinującego. Następnie pozostawia się go w temperaturze badania na zadany czas. Po jego upływie podnosi się wartość naprężenia ściskającego do określonej wartości z szybkością $0,69 \text{ MPa}/\text{min}$ (tj. $100 \text{ psi}/\text{min}$). Po uzyskaniu zadanej wartości naprężenia ściskającego odłącza się układ do uszkodzania warstwy podsadzki, podłącza się system do pomiaru przewodności warstwy podsadzki dla gazu (azotu) (rysunek 5) i przystępuje się do jej pomiaru. Układ pozostaje bez przepływu gazu (azotu) w warunkach temperatury i ciśnienia na okres 50 godz. ($\pm 2 \text{ godz.}$). Po upływie tego czasu przystępuje się do ponownego pomiaru przewodności warstwy podsadzki dla gazu (azotu) [17].



Rys. 5. Schemat zmodyfikowanego stanowiska do pomiaru przewodności warstwy materiału podsadzkowego uszkodzonej przez płyn szczelinujący [17]

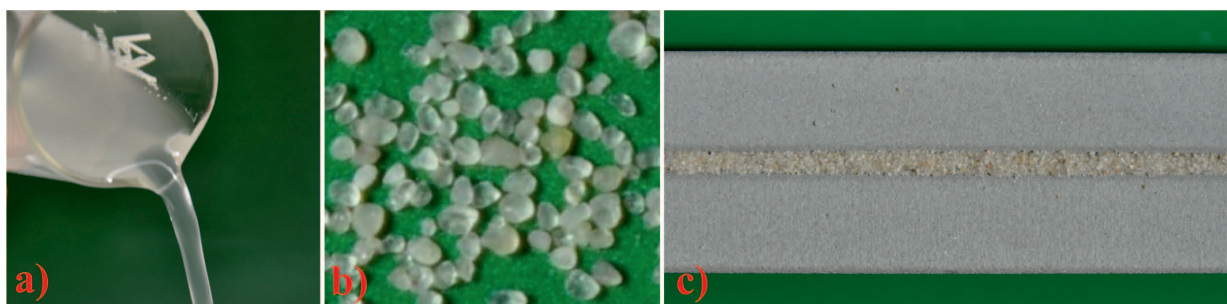
Charakterystyka skały złożowej, płynu szczelinującego oraz materiału podsadzkowego użytego do badań

Złoża niekonwencjonalne typu łupkowego występują w Polsce najczęściej na średnich głębokościach, rzędu 2000÷3500 m, gdzie panują naprężenia ściskające w granicach 41,4÷69,0 MPa (6000÷10 000 psi), a temperatura złożowa wynosi około 60÷100°C. Ze względu na trudności związane z uzyskaniem kształtek skalnych charakterystycznych dla skały złożowej typu łupkowego postanowiono do badań użyć kształtek skalnych wyciętych ze skały piaskowcowej OHIO (rysunek 6c). Stosuje się je do długotrwałych testów przewodności materiału podsadzkowego. Do badań użyto płynu szczelinującego typu *slickwater* (rysunek 6a) o składzie [17]:

- woda wodociągowa,
- 200 ppm środka bakteriobójczego;

- 0,5 ml/l anionowego polimeru na bazie poliakrylamidu, o wysokiej masie molekularnej,
- 0,1% stabilizatora osadów siarczanu wapnia, siarczanu baru oraz osadów węglanowych,
- 0,1% stabilizatora smektytu, illitu i mieszanopakietowych minerałów ilastych,
- 0,2% mikroemulsji.

Do podsadzenia szczeliny została wykorzystana podsadzka kwarcowa (piasek) o rozmiarze ziaren 0,425÷0,212 mm (40÷70 mesh), którą przedstawiono na rysunku 6b. Następnie podsadzka była umieszczana pomiędzy dwiema kształtkami z piaskowca OHIO [17, 24, 26], co zaprezentowano na rysunku 6c.



Rys. 6. Wygląd: a) płynu szczelinującego; b) podsadzki kwarcowej; c) umieszczenie podsadzki pomiędzy kształtkami skalnymi z piaskowca OHIO, przed uszkodzeniem jej płynem szczelinującym [17]

Wykonanie badań laboratoryjnych przewodności warstwy materiału podsadzkowego uszkodzonej przez płyn szczelinujący

Badania laboratoryjne przeprowadzono w następujących warunkach [17]:

- temperatura: 80°C (tj. 353,15 K),
- naprężenie ściskające: 41,4 MPa (tj. 6000 psi),
- czas oddziaływania naprężenia ściskającego: 50 godzin (±2 godziny),
- koncentracja powierzchniowa podsadzki kwarcowej (40÷70 mesh) 4,88 kg/m² (tj. 1 lb/ft²),
- pomiar przewodności warstwy podsadzki uszkodzonej przez płyn szczelinujący dla azotu na początku oraz na końcu testu,
- płyn szczelinujący typu *slickwater*, najczęściej stosowany do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych typu łupkowego.

Lepkość dynamiczna płynu szczelinującego w temperaturze pokojowej, przy szybkości ścinania rzędu 100 s⁻¹, wynosiła 9 mPa · s, a w 80°C była równa 6 mPa · s. Natomiast po upływie 2 godzin jego lepkość w temperaturze 80°C, przy szybkości ścinania 100 s⁻¹, wynosiła 3 mPa · s.

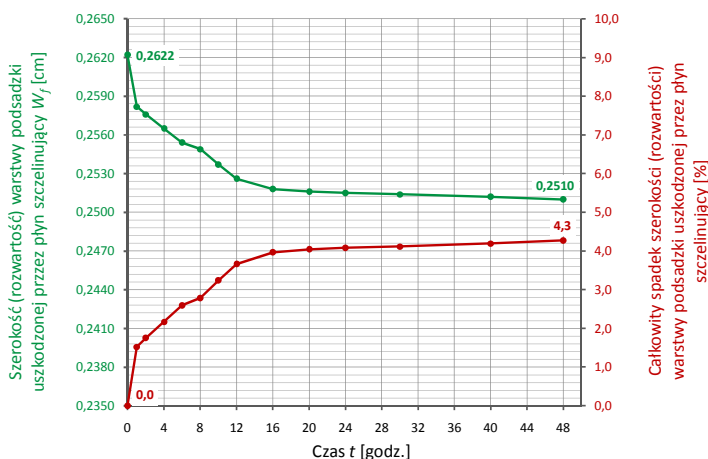
Badany piasek kwarcowy spełnia wszystkie kryteria podstawowych właściwości stawianych podsadzce kwarcowej przez normy [22, 23, 25] i może być stosowany w zabiegach hydraulicznego szczelinowania. Podsadzka została zaklasyfikowana do klasy 6K według procedury określonej w aneksie B [23]. Klasa 6K odpowiada maksymalnej wartości naprężenia ściskającego 41,1 MPa powodującego zniszczenie nie więcej niż 10% ziaren podsadzki.

Przez warstwę podsadzki przetłaczano płyn szczelinujący z wydatkiem 10 ml/min przez 15 minut, przy otwartych portach filtracyjnych i zadanym przeciwcisnieniu, rzędu 0,69 MPa (100 psi), w temperaturze 80°C [17]. Zapewnia to filtrację płynu w ściany szczeliny. Następnie przy zamkniętych portach filtracyjnych przez 15 minut tłoczono płyn wzdłuż warstwy podsadzki z wydajnością 10 ml/min i pozostawiono zamkniętą komorę w warunkach *P*, *T* przez okres 2 godzin. Po upływie tego czasu zwiększono naprężenie ściskające szczelinę do wartości 41,4 MPa i przystąpiono do właściwego testu pomiarowego. Przewodność i prze-

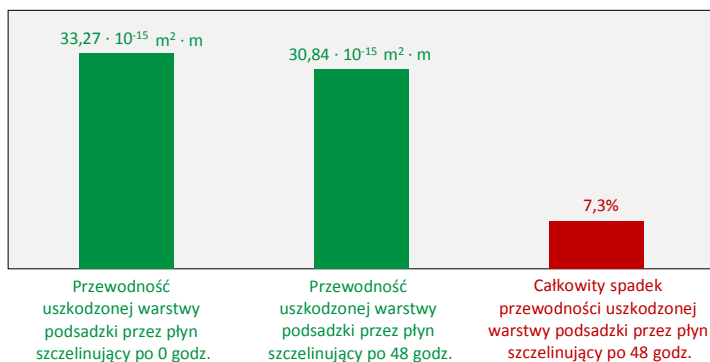
Tablica 1. Dane pomiarowe oraz rezultaty testu przewodności i przepuszczalności warstwy podsadzki uszkodzonej przez płyn szczelinujący dla zawilgoconego azotu w 80°C [17]

Czas, po [godz.]	Wydatek przepływu [l/min]	W_f [cm]	P_1 [psi]	P_2 [psi]	$P_1^2 - P_2^2$ [10^{10} Pa ²]	x [10^7 1/m ²]	y [10^{13} 1/m ³]	a [$1/m$]	b [10^{13} 1/m ² · m]	W_f [cm]	$k_f \cdot W_f$ [10^{-15} m ² · ft]	$k_f \cdot W_f$ [10^{-15} m ² · m]	k_f [10^{-12} m ²]
0	2,01	0,2594	54,51	51,95	1,292	0,862	3,300	349 321	3,006	0,2585	131,31	33,27	12,87
	4,11	0,2585	59,46	51,96	2,889	1,773	3,611						
	6,18	0,2582	65,42	51,95	4,731	2,672	3,933						
	8,22	0,2583	71,57	51,94	6,934	3,550	4,333						
	10,29	0,2582	77,85	51,95	9,017	4,447	4,502						
	2,06	0,2510	55,01	52,09	1,461	0,941	3,647						
48	4,11	0,2510	61,02	52,10	3,720	1,880	4,650	650 435	3,243	0,2511	122,21	30,84	12,28
	6,16	0,2510	67,71	52,10	6,205	2,818	5,174						
	8,22	0,2511	74,87	52,11	9,227	3,755	5,769						
	10,27	0,2512	82,35	52,11	12,260	4,688	6,134						

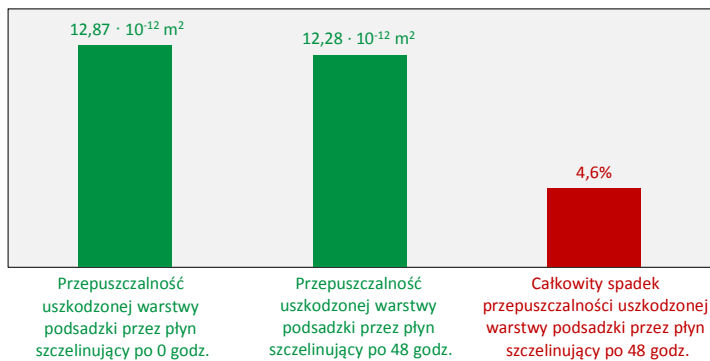
puszczalność były wyznaczane dla średnich arytmetycznych wartości uzyskiwanych dla kilku różnych wydatków tłoczonego azotu, rzędu 2, 4, 6, 8, 10 SLPM (tj. l/min w warunkach standardowych $T = 20^\circ\text{C}$ i $P = 0,1 \text{ MPa} = 14,503 \text{ psi}$), w ustalonych warunkach przepływu zawilgoconego azotu, przy zadanej wartości przeciwności, rzędu 0,345 MPa (tj. 50 psi) [17, 21]. Wyniki testu zostały przedstawione w tablicy 1 i na rysunkach 7, 8, 9, 10.



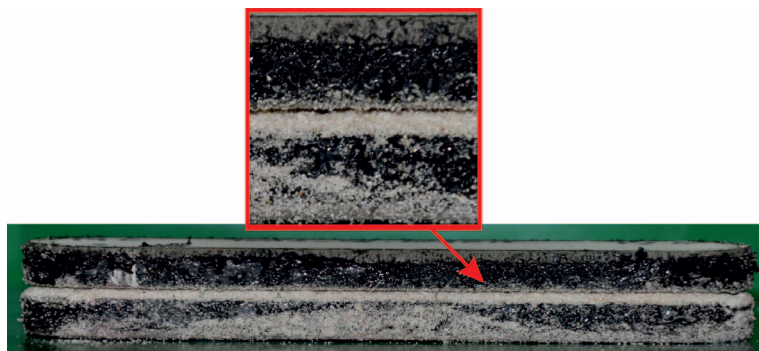
Rys. 7. Zmiana szerokości (rozwartości) warstwy materiału podsadzki uszkodzonej przez płyn szczelinujący oraz całkowity spadek rozwartości przez okres 48 godzin w 80°C



Rys. 8. Zmiana przewodności uszkodzonej warstwy materiału podsadzki przez płyn szczelinujący oraz całkowity spadek przewodności po 48 godzinach w 80°C



Rys. 9. Zmiana przepuszczalności uszkodzonej warstwy materiału podsadzki przez płyn szczelinujący oraz całkowity spadek przepuszczalności po 48 godzinach w 80°C



Rys. 10. Wygląd uszkodzonej przez płyn szczelinujący warstwy podsadzki umieszczonej pomiędzy dwiema kształtkami skalnymi po 48-godzinym teście w 80°C [17]

Podsumowanie i wnioski

Na potrzeby wykonania badań laboratoryjnych dostosowano istniejące stanowisko *Proppant Conductivity Unit* do badań przewodności materiału podsadzkiowego za pomocą gazu (azotu). Opracowano również metodykę badawczą, która została wykorzystana do wykonania badania przewodności warstwy podsadzki uszkodzonej przez płyn szczelinujący.

Test przeprowadzono z zastosowaniem technologii *slickwater fracturing*, najczęściej używanej do hydraulicznego szczelinowania formacji łupkowych. W przypadku uszkodzonej przez płyn szczelinujący na bazie polimeru syntetycznego (poliakrylamidu) warstwy piasku kwarcowego o granulacji ziaren rzędu 425÷212 μm (40÷70 mesh) w temperaturze

80°C zanotowano przez okres 48 godzin spadek jej szerokości (rozwartości) z 0,2622 cm do 0,2510 cm, tj. o 4,3%. Wartość przewodności zmniejszyła się z $33,27 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ do $30,84 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$, tj. spadek o 7,3%, a przepuszczalność z $12,87 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ zmalała do $12,28 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, tj. spadek o 4,6%.

Warto również podkreślić, że wartości przewodności i przepuszczalności uszkodzonej przez płyn szczelinujący warstwy podsadzki zostały określone w warunkach złożowych, dla przepływu gazu (azotu). Zastosowanie jako medium roboczego gazu (azotu) lepiej odzwierciedla rzeczywiste warunki występujące w odwiertach gazowych.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2016, nr 3, s. 177–185, DOI: 10.18668/NG.2016.03.04

Artykuł nadesłano do Redakcji 4.11.2015 r. Zatwierdzono do druku 20.01.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Badanie wpływu płynów szczelinujących na uszkodzenie hydroprzewodności szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkiowym w złożach węglowodorów* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-33/15, nr zlecenia: 0033/KS/15.

Literatura

- [1] Alramahi B., Sundberg M. I.: *Proppant Embedment and Conductivity of Hydraulic Fractures in Shales*. American Rock Mechanics Association, 2012, s. 12–291.
- [2] Biały E., Miezin S., Czupski M., Zajączkowski M., Zajdel Z.: *Badania stopnia uszkodzenia przewodności podsadzki płynami szczelinującymi – badanie modelowe na stanowisku Proppant Conductivity*. Dokumentacja IGNiG, Kraków, grudzień 1997, nr zlecenia: 59/KE, s. 5–9.
- [3] Chong K. K., Grieser W. V., Passman A., Tamayo H. C., Modeland N., Burke B. E.: *A Completions Guide Book to Shale-Play Development: A Review of Successful Approaches Towards Shale-Play Stimulation in the Last Two Decades*. CSUG/SPE, 2010, 133874, s. 5–14.
- [4] Czupski M., Kasza P., Czupski M., Biały E., Masłowski M., Wilk K.: *Płyny do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Praca statutowa INiG, nr zlecenia 76/KS/12, nr archiwalny: DK-4100-76/12, Kraków, październik 2012, s. 8–20.
- [5] Czupski M., Kasza P., Wilk K.: *Płyny do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. *Nafta-Gaz* 2013, nr 1, s. 42–50.
- [6] Economides M. J., Nolte K. G. (eds.): *Reservoir Stimulation*. Second edition. Houston 1989.
- [7] Handren P., Palish T.: *Successful Hybrid Slickwater-Fracture Design Evolution – An East Texas Cotton Valley Taylor Case History*. SPE 2007, 110451, s. 1–6.
- [8] Kasza P.: *Zabiegi stymulacji wydobycia w niekonwencjonalnych złożach węglowodorów*. *Nafta-Gaz* 2011, nr 10, s. 697–701.
- [9] Kasza P., Biały E., Czupski M., Masłowski M., Wilk K.: *Nowe technologie w zakresie hydraulicznego szczelinowania i kwasowania złóż*. Dokumentacja INiG, Krosno, grudzień 2011, nr zlecenia 1269/KS/11, nr archiwalny: DK-4100-112/11, s. 22–47.
- [10] Kasza P., Czupski M., Biały E.: *Nowe technologie stymulacji wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego*. Projekt: PRO-GEOGAZ INiG, Krosno 2004.
- [11] King G. E.: *Thirty Years of Gas Shale Fracturing: What Have We Learned?* SPE 2010, 133456, s. 50.
- [12] Masłowski M.: *Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkiowego w ściany szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. *Nafta-Gaz* 2015, nr 7, s. 461–471.
- [13] Masłowski M.: *Materiały podsadzkiowe do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. *Nafta-Gaz* 2014, nr 2, s. 75–86.

- [14] Masłowski M., Czupski M.: *Podstawowe właściwości materiałów podsadzkowych stosowanych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów*. Przegląd Górniczy 2014, nr 12, s. 44–50.
- [15] Masłowski M., Kasza P., Czupski M., Biały E., Wilk K., Stachowicz A.: *Opracowanie metodyki badania materiałów podsadzkowych do zabiegów szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Praca statutowa INiG, nr zlecenia 80/KS/13, nr archiwalny: DK-4100-80/13, Krosno, październik 2013, s. 1–21.
- [16] Masłowski M., Kasza P., Czupski M., Biały E., Wilk K., Stachowicz A., Moska R.: *Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu szczelinowania*. Praca statutowa INiG – PIB, nr zlecenia 20/KS/14, nr archiwalny: DK-4100-20/147, Krosno, październik 2014, s. 1–12.
- [17] Masłowski M., Kasza P., Czupski M., Biały E., Wilk K., Stachowicz A., Moska R.: *Badanie wpływu płynów szczelinujących na uszkodzenie hydroprzewodności szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym w złożach węglowodorów*. Praca statutowa INiG, nr zlecenia 33/KS/15, nr archiwalny: DK-4100-33/15, Krosno, wrzesień 2015, s. 6–47.
- [18] Morales H.: *Sustaining Fracture Area and Conductivity of Gas Shale Reservoirs for Enhancing Long-Term Production and Recovery*. Research Partnership to Secure Energy for America, Unconventional Gas Conference 2012: Geology, the Environment, Hydraulic Fracturing, Canonsburg, 17–18.04.2012.
- [19] Palisch T. T., Vincent M. C., Handren P. J.: *Slickwater Fracturing – Food for Thought*. SPE 2008, 115766, s. 1–20.
- [20] Reinicke A., Rybacki E., Stanchits S., Huenges E., Dresen G.: *Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms – Implications from laboratory testing of tight sandstone – proppant systems*. Chemie der Erde – Geochemistry 2010, vol. 70, s. 107–117.
- [21] Zhu Ding: *Advanced hydraulic fracturing technology for unconventional tight gas reservoirs*. Project no. 07122-33 Research Partnership to Secure Energy for America, Texas 1.08.2012, s. 39–41.
- Akty prawne i normatywne**
- [22] International Standard ISO 13503-2:2006(E): *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, Annex A – Formazin solution preparation*. First edition, 1.11.2006.
- [23] International Standard ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009(E): *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations, AMENDMENT 1: Addition of Annex B: Proppant specification*. 1.11.2009.
- [24] International Standard ISO 13503-5:2006: *Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 5: Procedures for Measuring the Long-term Conductivity of Proppants*. First edition, 2006.
- [25] Polska Norma PN-EN ISO 13503-2: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Płyny i materiały do dowiercania złóż – Część 2: Pomiary właściwości materiałów podsadzkowych używanych podczas zabiegów hydraulicznego szczelinowania oraz wykonywania obsypki żwirowej*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, styczeń 2010.
- [26] Polska Norma PN-EN ISO 13503-5: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Materiały i płyny do dowiercania złóż – Część 5: Procedury pomiaru długotrwałej przewodności materiałów podsadzkowych*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, wrzesień 2009.



Mgr inż. Mateusz MASŁOWSKI
Asystent w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mateusz.maslowski@inig.pl