

Mateusz Masłowski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

## Badania odbudowy przewodności warstwy podsadzki dla gazu (azotu) po zabiegu szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

W artykule przedstawiono tematykę związaną z technologią tworzenia szczelin, uszkodzeniem pierwotnej przewodności warstwy materiału podsadzkowego oraz odbudową jej pierwotnej przewodności po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych. Zagadnienie to dotyczy oczyszczania warstwy podsadzki przez przepływający gaz z pozostałości po płynie szczelinującym. Przedstawiono również metodykę badania wielkości oczyszczenia szczeliny z płynu zabiegowego przez przepływający gaz. Badania wykonano dla lekkiej podsadzki ceramicznej oraz płynu szczelinującego na bazie naturalnego polimeru liniowego (guar) o koncentracji  $3,6 \text{ kg/m}^3$  (tj. 30 lb/1000 gal). Technologia ta stosowana jest często do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych typu łupkowego *shale gas* oraz piaskowców typu *tight gas*. Podsadzka była umieszczona pomiędzy dwoma kształtkami skalnymi. Koncentracja powierzchniowa podsadzki wynosiła  $9,76 \text{ kg/m}^2$  (tj. 2 lb/ft<sup>2</sup>). Do badań przyjęto temperaturę  $80^\circ\text{C}$  oraz naprężenie ściskające  $41,4 \text{ MPa}$  (tj. 6000 psi). Czas zadanego oddziaływania naprężenia ściskającego na warstwę podsadzki wynosił 36 godz. Dla wstępnego dwugodzinnego oczyszczania uszkodzonej warstwy podsadzki jej przewodność dla zawilgoconego gazu (azotu) wynosiła  $425,54 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$  po upływie 36 godzin oddziaływania zadanego naprężenia ściskającego. Wstępne oczyszczanie szczeliny z polimeru przez gaz odbywało się przy przepływie 2 l/min. Pierwotna przewodność tej szczeliny, bez uszkodzenia płynem szczelinującym, wynosiła  $651,17 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ . Tym samym po wstępnym oczyszczaniu szczeliny z płynu uzyskano 65,4% odbudowy jej pierwotnej przewodności dla zawilgoconego gazu (azotu). Wielkość uszkodzenia pierwotnej przewodności warstwy podsadzki przez polimer liniowy wynosiła 34,6%.

Słowa kluczowe: szczelinowanie hydrauliczne, podsadzka, uszkodzenie przewodności podsadzki, płyn szczelinujący, złoża niekonwencjonalne.

### The studies of the reconstruction of the original conductivity of the proppant pack for the gas (nitrogen) after the hydraulic fracturing treatment of unconventional reservoirs

This article presents the issues of technology used to create the rock fractures, process of damage to original proppant pack conductivity and the reconstruction of its original conductivity after hydraulic fracturing in unconventional deposits. It is connected to the removal of the remains of the fracturing fluid from the proppant pack, by the wet gas (nitrogen). The tests were performed for the light ceramic proppant and the fracturing a fluid based on a linear polymer (guar) with a concentration of up to  $3.6 \text{ kg/m}^3$  (30 lb/1000 gal). This technology is often used for the hydraulic fracturing of unconventional reservoirs including fracturing in shales and tight gas sandstone. Proppant was placed between two Ohio sandstone's slabs. The concentration of proppant amounted to  $9.76 \text{ kg/m}^2$  (2 lb/ft<sup>2</sup>). The studies were performed at  $80^\circ\text{C}$ , and the compressive stress  $41.4 \text{ MPa}$  (6000 psi). The compressive stress was applied to the proppant pack for 36 hours. After 2-hour pre-cleaning of the proppant pack damaged by the fracturing fluid, the conductivity for wet gas (nitrogen) after 36 hours, amounted to  $425.54 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ . Pre-cleaning of the proppant pack by gas was performed at the flow rate of 2 l/min. The original conductivity of proppant pack for the wet gas (nitrogen) before the damage to the fluid was  $651.17 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ . Thus after the pre-treatment of the damaged proppant pack 65.4% recovery of its original conductivity was obtained for the wet gas (nitrogen). The damage to the original conductivity of the proppant pack by a linear polymer was 34.6%.

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

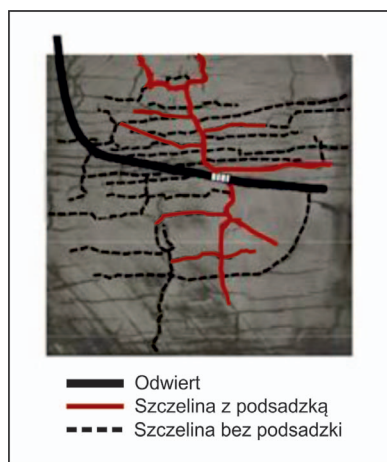
## Wstęp

Wydobycie węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych jest stosunkowo nową gałęzią przemysłu naftowego. Odgrywa ono dużą rolę w światowym bilansie energetycznym. Również na terenie Polski wykonywane są prace geologiczno-poszukiwawcze w tym zakresie. Wydobycie węglowodorów z takich złóż związane jest z koniecznością zastosowania zaawansowanych technologii. Złóża niekonwencjonalne to między innymi: formacje łupkowe (z ang. *shale gas*) oraz formacje piaskowcowe (z ang. *tight gas*) [5, 6, 12, 13, 14, 16–19, 22]. Złóża typu łupkowego *shale gas* charakteryzują się matrycą o bardzo niskiej porowatości oraz przepuszczalności (w niektórych przypadkach poniżej 0,001 mD). W łupkach podstawowym składnikiem budującym matrycę skalną jest kwarc (60÷70%) oraz minerały ilaste – przede wszyst-

kim illit (30÷40%) [12, 13, 14, 16–19]. Złóża tego typu występują w Polsce najczęściej na średnich głębokościach, rzędu 2000÷3500 m, gdzie panują naprężenia ściskające rzędu 41,4÷69,0 MPa (6000÷10000 psi), a temperatura złożowa jest rzędu 60÷100°C [12, 13, 14, 16–19]. Formacje piaskowcowe typu zamkniętego *tight gas* cechują się małą przepuszczalnością i porowatością. Ich przepuszczalność dla gazu wynosi nie więcej niż 0,1 mD [12, 13, 14, 16–18]. Składnikiem budującym matrycę skalną jest kwarc. Występują one na głębokościach 3000÷4500 m, gdzie panują temperatury rzędu 70÷120°C oraz naprężenia ściskające 41,4÷82,8 MPa (6000÷12000 psi). W celu eksploatacji takich złóż stosuje się zabiegi umożliwiające uwolnienie się zaadsorbowanego gazu oraz jego przepływ do odwiertu.

### Technologia stosowana do tworzenia szczelin podczas zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

Aby zabiegi stymulacyjne w formacjach niekonwencjonalnych były skuteczne, należy wytworzyć w złożu system licznych szczelin, mikroszczelin (rysunek 1), umożliwiających uwolnienie się zaadsorbowanego gazu [4, 5, 8, 12–14, 16–19].



Rys. 1. Schemat systemu szczelin i mikroszczelin powstałych po wykonanym zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych [12, 18–20]

Do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych stosuje się: roztwory naturalnych lub syntetycznych polimerów liniowych, piany, sieciowany żel polimerowy lub zabiegi hybrydowe [4–7, 11–14, 16–21]. W przypadku hydraulicznego szczelinowania złóż gazowych typu łupkowego *shale gas*, charakteryzujących się niskim stopniem plastyczności (tzw. łupek kruchy), wykorzystuje się najczęściej technologię *slickwater fracturing*. Polega ona na zastosowaniu polimeru liniowego na bazie wody z dodatkiem niewielkiej ilo-

ści polimeru naturalnego lub syntetycznego charakteryzującego się bardzo niską lepkością. Często używane są również polimery liniowe o zwiększonej ilości polimeru naturalnego o koncentracji 3,6 kg/m<sup>3</sup>, tj. 30 lb/1000 gal. Wykorzystuje się je w szczególności do szczelinowania skał łupkowych cechujących się podwyższoną obecnością minerałów ilastych (tzw. łupki plastyczne). Stosuje się je również w końcowej fazie zabiegu szczelinowania kruchych łupków w celu lepszego podsadzenia szczeliny proppantem w pobliżu odwiertu (tj. uzyskania większej rozwartości szczeliny w strefie przyodwiertowej). Polimery liniowe o podwyższonej koncentracji polimeru wykorzystuje się także podczas szczelinowania skały piaskowcowej o małej przepuszczalności typu zamkniętego *tight gas*.

Podczas wtłaczania płynu szczelinującego następuje zjawisko jego filtracji w skałę złożową (ścianę szczeliny) [2, 3, 6, 12, 17]. Wskutek tego dochodzi do zatrzymania płynu (wzrostu stężenia polimeru) w pobliżu ściany szczeliny oraz wewnątrz szczeliny wypełnionej podsadzką (tj. w warstwie podsadzki). Następuje wówczas wytworzenie się czterech stref (rysunek 2) charakteryzujących uszkodzenie wytworzonej szczeliny:

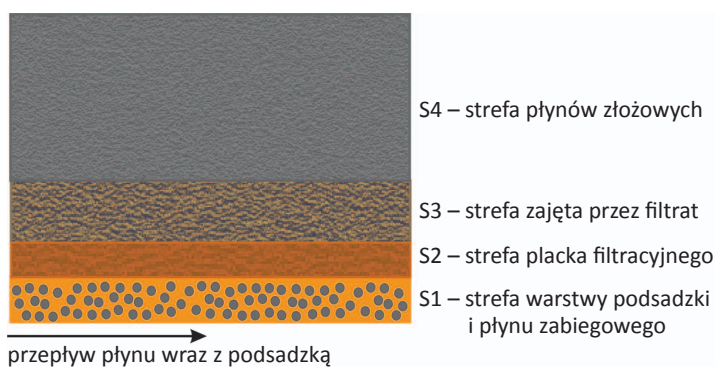
- warstwy podsadzki wypełnionej płynem zabiegowym (S1);
- placka filtracyjnego, tzw. z ang. *filter cake*, o różnej grubości (S2);
- strefy zajętej przez filtrat (S3);
- obszaru zajmowanego wyłącznie przez płyny złożowe (S4).

Jako materiał podsadzkowy najczęściej stosowany jest piasek kwarcowy o rozmiarze ziaren rzędu 425÷212 μm

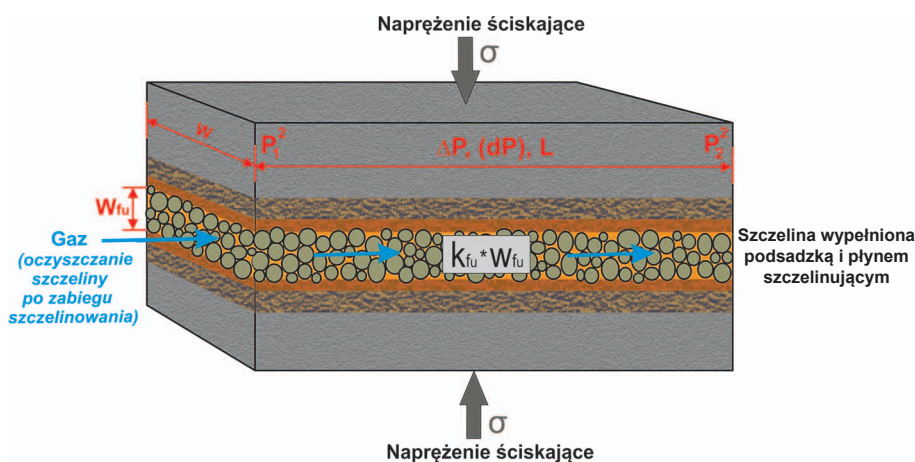
(40÷70 mesh) lub 600÷300  $\mu\text{m}$  (30÷50 mesh) [7, 12–17, 19]. W przypadku występowania wysokich temperatur oraz ciśnień złożowych zaleca się użycie piasku kwarcowego dodatkowo pokrytego powłoką z żywicy (RCS – *resin-coated sand*) lub lekkiej podsadzki ceramicznej (LCP – *light ceramic proppants*). Zadaniem podsadzki jest podtrzymanie rozwartości 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 metrów sześciennych) oraz materiału podsadzkowego (setki ton).

Dlatego też przy wyborze technologii do wykonania szczelinowania konkretnego złoża przydatne jest określenie wielkości odbudowy pierwotnej uszkodzonej płynem zabiegowym przewodności warstwy podsadzki przez przepływający gaz (rysunek 3) [12, 17, 19].



Rys. 2. Schemat filtracji płynu szczelinującego w skałę złożową oraz wypełnienia płynem warstwy podsadzki podczas zabiegu szczelinowania [2, 3, 6, 12, 17]



Rys. 3. Wizualizacja odbudowy uszkodzonej płynem pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla przepływającego gazu po wykonaniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów [12, 17, 19]

### Metodyka badania wielkości odbudowy pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla zawilgoconego gazu (azotu) po wykonanym zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża węglowodorów

W celu prawidłowego przeprowadzenia laboratoryjnej symulacji odbudowy uszkodzonej pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla gazu (azotu), po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz, oraz wykonania analizy uzyskanych wyników należy postępować w sposób następujący:

- Scharakteryzować warunki złożowe oraz technologię wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania złoża [1, 12, 13, 16–19].

W tym celu należy zebrać informacje na temat: 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 użytych do zabiegu szczelinowania.

- Określić właściwości skały użytej do badań [1, 12, 13, 17–19, 22].

Właściwości skały złożowej charakteryzuje między innymi jej skład mineralogiczny oraz wielkości mechaniczne (statyczny i dynamiczny moduł Younga oraz współczynnik Poissona).

- Określić właściwości reologiczne płynu szczelinującego [6, 9, 10, 12, 17, 19].

Płyny szczelinujące posiadają nienewtonowską charakterystykę reologiczną. Do określenia ich współczynnika lepkości dynamicznej wykorzystuje się model potęgowej (ang. *power law model*) uwzględniający pomiar współczynników  $n'$  i  $K'$  następującego równania (1): [6, 9, 10, 12, 17, 19]

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

gdzie:

$\mu$  – lepkość dynamiczna [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ],

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

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

$K'$  – współczynnik konsystencji [ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{n'}$ ].

- Wyznaczyć podstawowe właściwości materiału podsadzkowego [12, 14, 15, 17, 19, 24, 25, 27].

Podstawowe badania mają na celu stwierdzenie, czy badany materiał podsadzkowy może być stosowany jako propant do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż. Wykonuje się je na podstawie szczegółowo opisanych procedur pomiarowych zawartych w normach: ISO 13503-2:2006(E), ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009(E), PN-EN ISO 13503-2 [24, 25, 27].

- Przygotować kształtki skalne do badań [12, 17, 19, 26, 28].

Próbki skały użyte do badań powinny pochodzić ze skały złożowej odpowiadającej głębokości wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania. Kształtki skalne muszą posiadać określone wymiary według normy ISO 13503-5:2006 oraz PN-EN ISO 13503-5 [26, 28].

- Umieścić materiał podsadzkowy pomiędzy kształtkami skalnymi [12, 14, 17, 19, 26, 28].

W celu wyznaczenia masy  $m_p$  materiału podsadzkowego (w gramach), potrzebnej do wypełnienia szczeliny dla zadanej wartości koncentracji powierzchniowej podsadzki  $C$  (w  $\text{kg/m}^2$ ), należy jej wartość pomnożyć o współczynnik 6,452, przedstawiony w równaniu (2) [16, 19, 26, 28].

$$m_p = 6,452 \cdot C \quad (2)$$

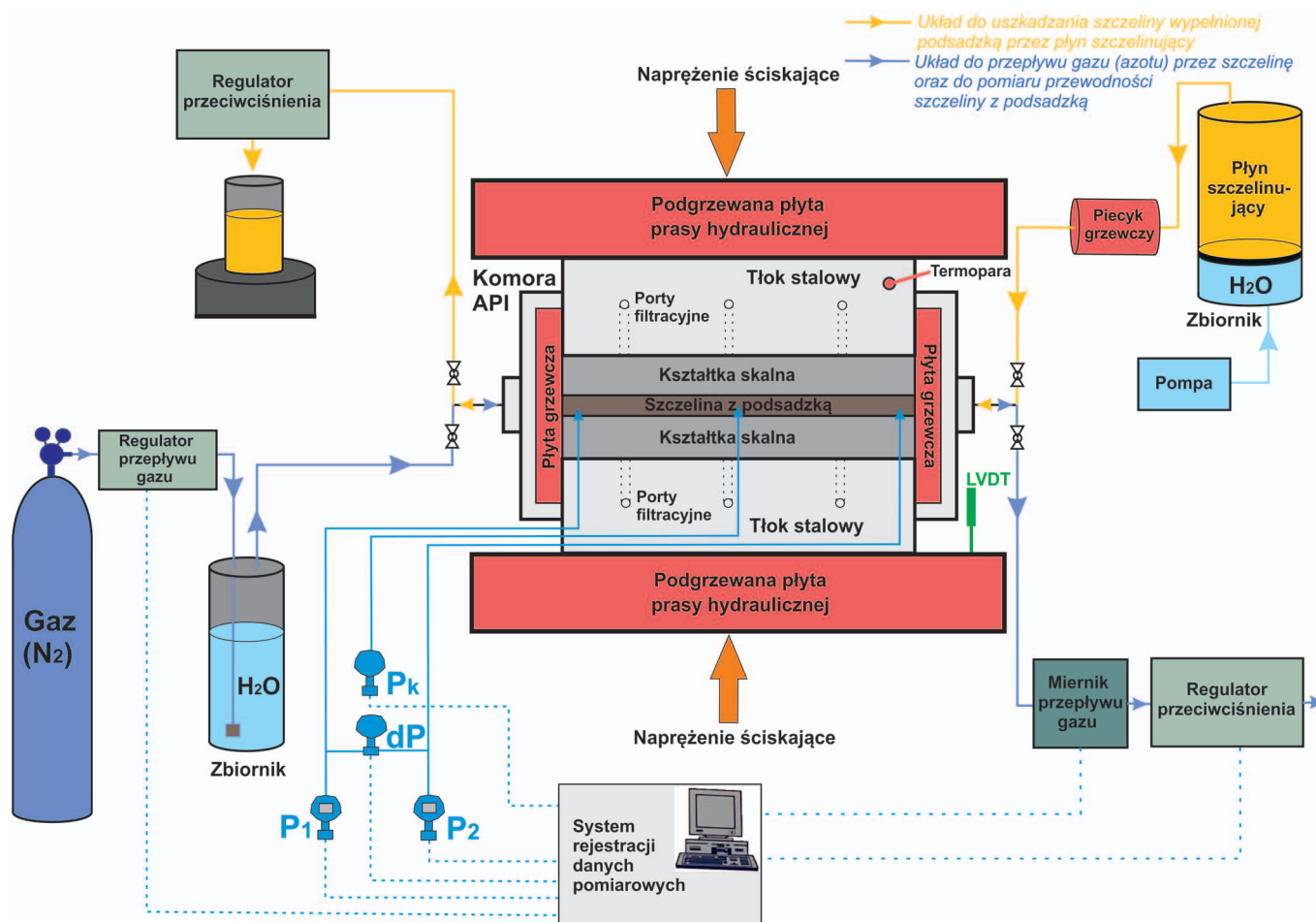
gdzie:

- $m_p$  – masa materiału podsadzkowego [g],
- $C$  – obciążenie wywierane przez materiał podsadzkowy (tj. koncentracja powierzchniowa podsadzki) [ $\text{kg/m}^2$ ],  $6,452 = 0,006452 \text{ m}^2 \cdot 1000 \text{ g/kg}$ , gdzie  $0,006452 \text{ m}^2$  jest powierzchnią otworu w komorze API (odpowiadającą powierzchni kształtki skalnej) [26, 28].

- Wykonać laboratoryjną symulację uszkodzenia płynem szczelinującym pierwotnej przewodności warstwy podsadzki oraz późniejszego jej oczyszczenia przez przepływający gaz (azot) [17].

Uszkodzenie szczeliny polega na przetłoczeniu przez nią płynu szczelinującego w ilości co najmniej 10 objętości porowych warstwy podsadzki, z zadaniem wydatkiem tłoczenia płynu, przy niewielkim naprężeniu ściskającym i zadanej temperaturze pomiaru.

Uszkodzenie szczeliny płynem, późniejsze oczyszczenie jej przez przepływający gaz oraz badanie jej przewodności wykonuje się na stanowisku badawczym, którego schemat został przedstawiony na rysunku 4 [12, 17, 19].



Rys. 4. Schemat zmodyfikowanego stanowiska do pomiaru przewodności warstwy materiału podsadzkowego oraz do jej uszkodzania płynem szczelinującym [12, 17, 19]

- Wyznaczyć przewodność dla warstwy podsadzki nieuszkodzonej oraz oczyszczanej z pozostałości po płynie szczelinującym przez przepływający zawilgocony gaz (azot) [12, 17, 19, 23].

Pomiar ciśnienia na początku i na końcu szczeliny oraz spadku ciśnienia na odcinku pomiarowym  $L$  wykonuje się dla kilku różnych wielkości wydatku gazu (azotu) przepływającego 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 (3), wprowadzającym współczynnik oporu przepływu turbulentnego (burzliwego)  $\beta$  [12, 17, 19, 23]:

$$\frac{(P_1^2 - P_2^2) \cdot M \cdot h}{2 \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot L \cdot \mu \cdot \rho \cdot Q} = \frac{\beta \cdot \rho \cdot Q}{W_f^2 \cdot \mu \cdot h} + \frac{1}{k_f \cdot W_f} \quad (3)$$

gdzie:

$P_1$  – ciśnienie absolutne na początku odcinka pomiarowego  $L$  [Pa],

$P_2$  – ciśnienie absolutne na końcu odcinka pomiarowego  $L$  [Pa],

$T$  – temperatura przepływającego gazu (azotu) [K],

$Q$  – wydatek przepływu gazu (azotu) [m<sup>3</sup>/s],

$k_f$  – przepuszczalność szczeliny wypełnionej materiałem podsadzkowym i płynem szczelinującym [m<sup>2</sup>],

$W_f$  – 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 między otworami ciśnieniowymi, tj. 0,1270 [m],

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

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

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

$\rho$  – gęstość gazu (azotu) [kg/m<sup>3</sup>],

$\mu$  – lepkość gazu (azotu) [Pa · s],

$\beta$  – współczynnik oporu przepływu turbulentnego [1/m].

Gęstość gazu (azotu) wyznacza się według równania stanu gazu doskonałego – równanie (4) [12, 17, 19].

$$\rho = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T} \quad (4)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość gazu (azotu) [kg/m<sup>3</sup>],

$P$  – 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 (5) [12, 17, 19].

$$\mu = \frac{-0,000066 \cdot T^2 + 0,251493 \cdot T + 157,982967}{10000} \quad (5)$$

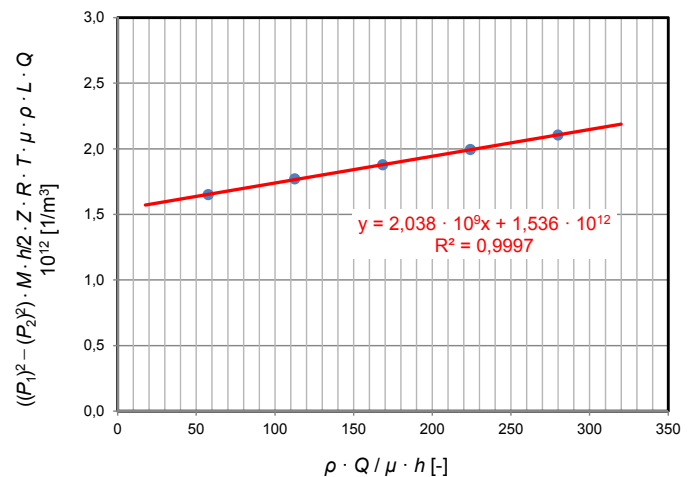
gdzie:

$\mu$  – lepkość dynamiczna gazu (azotu) [10<sup>-3</sup> Pa · s],

$T$  – temperatura gazu (azotu) [°F].

Do wyznaczenia przewodności  $k_f \cdot W_f$  warstwy podsadzki dla zawilgoconego gazu (azotu) według równania (3) wykorzystuje się równanie liniowe  $y = ax + b$ , gdzie wartością  $x$  jest  $\frac{\rho \cdot Q}{\mu \cdot h}$ , 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  $y$ , zgodnie z równaniem Forchheimera (3) [12, 17, 19, 23].

Przecięcie linii prostej z osią  $y$  odpowiada odwrotności przewodności warstwy podsadzki [12, 17, 19, 23]. Rysunek 5 przedstawia przykładowe dopasowanie linii prostej dla uzyskanych wyników z badań przewodności przy zastosowaniu równania Forchheimera (3) [17].



Rys. 5. Przykładowe dopasowanie linii prostej do wyznaczenia przewodności warstwy podsadzki w warunkach laboratoryjnych dla gazu (azotu) przy zastosowaniu równania Forchheimera [17]

Podczas testu rejestruje się: temperaturę ( $T_k$ ) w komorze API, temperaturę ( $T$ ) azotu przepływającego przez szczelinę z podsadzką, ciśnienie ( $P_k$ ) w komorze API, ciśnienie ( $P_1$ ) na początku i ( $P_2$ ) na końcu odcinka pomiarowego o długości  $L$ , spadek ciśnienia ( $\Delta P$ ) na odcinku pomiarowym  $L$ , tj. ciśnienie różnicowe ( $dP$ ), szerokość (rozwartość) szczeliny ( $W_f$ ), naprężenie ściskające ( $\sigma$ ) szczelinę z podsadzką.

- Do obliczenia wielkości odbudowy uszkodzonej pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla zawilgoconego gazu (azotu) oraz wielkości jej uszkodzenia – po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz wykorzystuje się równanie (6) [12, 17, 19].

$$OP_{k_f \cdot w_f} = \frac{k_{f_u} \cdot W_{f_u}}{k_{f_p} \cdot W_{f_p}} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie:

$OP_{k_f \cdot w_f}$  – wielkość odbudowy uszkodzonej pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla zawilgoconego gazu (azotu) po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz [%],

$k_{f_p} \cdot W_{f_p}$  – przewodność dla gazu (azotu) warstwy podsadzki wypełnionej materiałem podsadzkowym bez uszkodzania jej płynem szczelinującym [ $10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ ],

$k_{f_u}$  – przepuszczalność warstwy podsadzki wypełnionej materiałem podsadzkowym dla zawilgoconego gazu (azotu) bez uszkodzania jej płynem szczelinującym [ $10^{-12} \text{ m}^2$ ],

$k_{f_u} \cdot W_{f_u}$  – przewodność dla gazu (azotu) warstwy podsadzki uszkodzonej przez płyn szczelinujący po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz [ $10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ ],

$k_{f_u}$  – przepuszczalność dla gazu (azotu) uszkodzonej płynem szczelinującym szczeliny wypełnionej podsadzką po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz [ $10^{-12} \text{ m}^2$ ].

Wielkość uszkodzenia płynem szczelinującym pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla zawilgoconego gazu (azotu)  $U_{k_f \cdot w_f}$ , wyrażoną w %, po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz wyznacza się na podstawie równania (7).

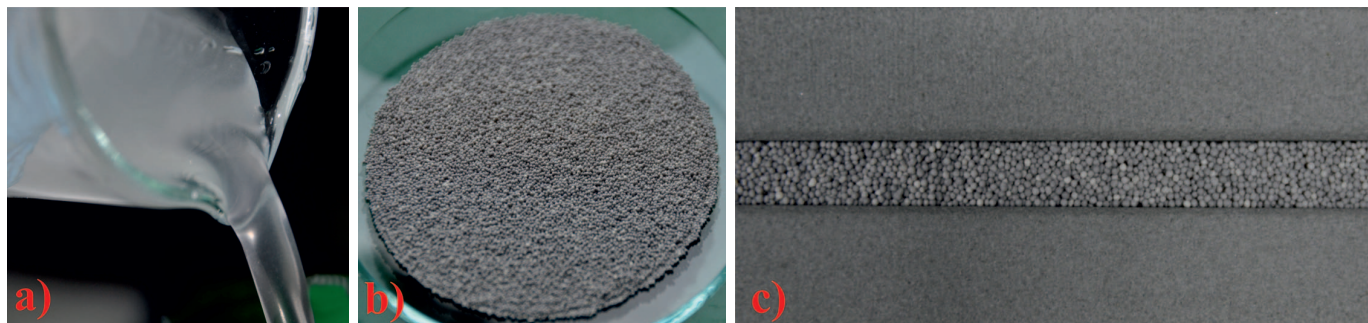
$$U_{k_f \cdot w_f} = 100 - OP_{k_f \cdot w_f} \quad (7)$$

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

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 o podwyższonej koncentracji polimeru naturalnego rzędu  $3,6 \text{ kg/m}^3$  (tj. 30 lb/1000 gal) (rysunek 6a) o składzie [17]: woda wo-

dociągowa, polimer naturalny (guar), środek bakteriobójczy, inhibitor minerałów ilastych, mikroemulsja.

Do podsadzenia szczeliny została wykorzystana lekka podsadzka ceramiczna o rozmiarze ziaren  $0,600 \div 0,300 \text{ mm}$  ( $30 \div 50 \text{ mesh}$ ), którą przedstawiono na rysunku 6b. Podsadzka była umieszczana pomiędzy dwoma kształtkami z piaskowca Ohio [12, 17, 19, 26, 28], co zaprezentowano na rysunku 6c.



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

### Wykonanie badań laboratoryjnych odbudowy uszkodzonej przewodności warstwy podsadzki dla gazu (azotu) po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz

Badania laboratoryjne wykonano na podstawie opracowanej w INiG – PIB metodyki badawczej dla następujących warunków [17]:

- temperatury  $80^\circ\text{C}$  (tj. 353,15 K),
- koncentracji powierzchniowej lekkiej podsadzki ceramicznej  $9,76 \text{ kg/m}^2$  (tj. 2 lb/ft<sup>2</sup>),
- naprężenia ściskającego  $41,4 \text{ MPa}$  (tj. 6000 psi),
- wzrostu naprężenia ściskającego (szybkość zaciskania się szczeliny po zabiegu szczelinowania) do zadanej wartości z szybkością  $0,69 \text{ MPa/min}$  (tj. 100 psi/min),

- czasu oddziaływania naprężenia ściskającego 36 godzin,
- polimeru liniowego o koncentracji polimeru naturalnego rzędu  $3,6 \text{ kg/m}^3$  (tj. 30 lb/1000 gal), często stosowanego do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych typu łupkowego *shale gas* oraz piaskowców typu *tight gas*,
- przepływu zawilgoconego gazu (azotu).

Lepkość dynamiczna płynu szczelinującego w temperaturze pokojowej, przy szybkości ścinania rzędu  $100 \text{ s}^{-1}$  wynosiła  $36 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , a w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  na początku testu wynosiła  $17 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , a po upływie 90 minut testu:  $14 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ .

Przy szybkości ścinania  $40 \text{ s}^{-1}$  – na początku testu lepkość wynosiła  $22 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , natomiast po upływie 90 minut:  $18 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  w  $80^\circ\text{C}$ .

Badana lekka podsadzka ceramiczna spełnia wszystkie kryteria podstawowych właściwości stawianych podsadzce kwarcowej przez normy [24, 25, 27] i może być stosowana w zabiegach hydraulicznego szczelinowania. Podsadzka została zaklasyfikowana do klasy 12K wg procedury określonej w ISO 13503-2:2006/Amd.1:2009(E) [25]. Klasa 12K odpowiada maksymalnej wartości naprężenia ściskającego  $82,8 \text{ MPa}$ , powodującego zniszczenie nie więcej niż 10% ziaren podsadzki. Posiadała ona gęstość nasypową rzędu  $1,51 \text{ g/cm}^3$ .

W celu określenia wielkości odbudowy uszkodzonej płynem szczelinującym pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla gazu (azotu) oraz wielkości jej uszkodzenia – po oczyszczeniu jej przez przepływający gaz wykonano dwa testy. Pierwszy test, oznaczony jako „test 1”, polegał na pomiarze pierwotnej przewodności warstwy podsadzki (bez uszkodzania jej płynem szczelinującym) dla gazu (azotu) po 36 godzinach oddziaływania naprężenia ściskającego. Natomiast w drugim teście, oznaczonym jako „test 2”, mierzono przewodność uszkodzonej płynem szczelinującym warstwy podsadzki dla gazu (azotu) po 36 godzinach oddziaływania naprężenia ściskającego. Przed właściwym pomiarem przewodności warstwy podsadzki przetłaczano przez nią gaz (azot) z wydatkiem 2 l/min przez 2 godziny w celu oczyszczenia szczeliny z pozostałości po płynie szczelinującym [17].

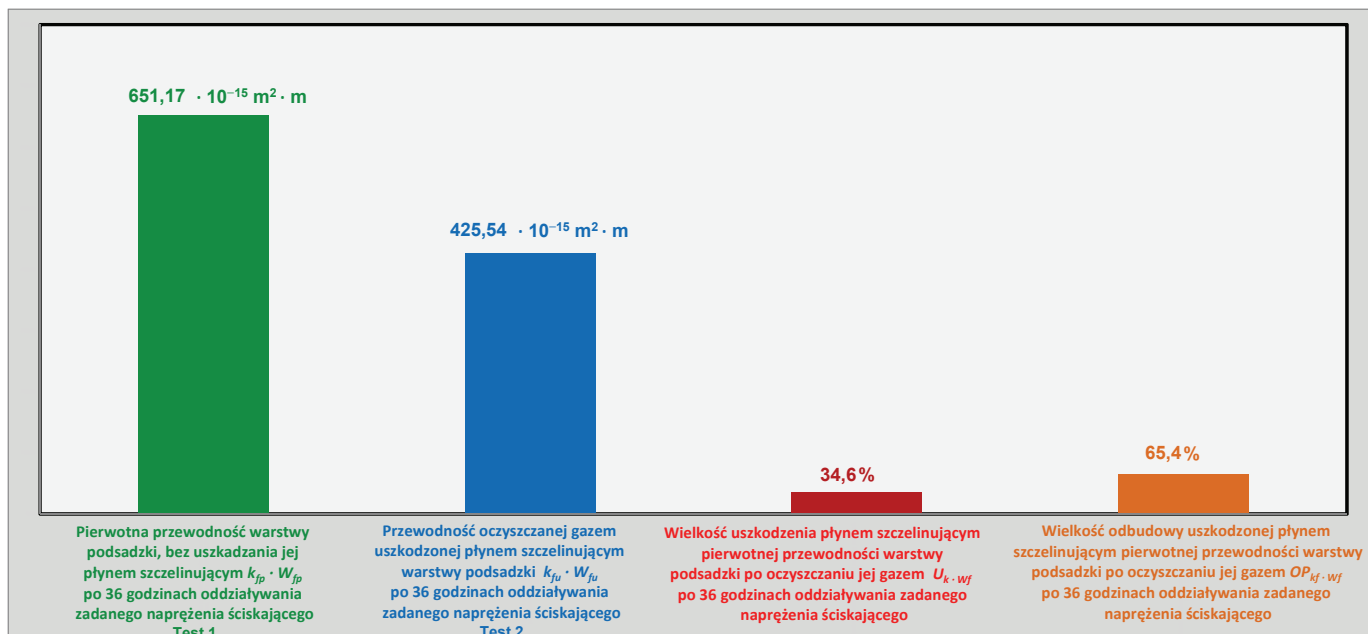
Po odpowietrzeniu szczeliny płynem szczelinującym – w teście nr 2 uszkodzenie szczeliny uzyskano poprzez przetłoczenie przez nią płynu w ilości około 10 objętości porowych warstwy podsadzki, tj. 150 ml. Po podniesieniu naprężenia ściskającego do wartości zadanej  $41,4 \text{ MPa}$  utrzymywano zamkniętą komorę API wraz z płynem szczelinującym i podsadzką w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  przez okres 34 godzin. Następnie przystępowano do oczyszczenia

Tablica 1. Dane pomiarowe oraz rezultaty testu pierwotnej przewodności warstwy podsadzki nieuszkodzonej przez płyn szczelinujący dla zawilgoconego gazu (azotu) po oczyszczeniu szczeliny azotem z wydatkiem 2 l/min przez 2 godziny, test nr 1, w  $80^\circ\text{C}$  [17]

Czas [godz.]	Wydatek przepływu [l/min]	$W_{fp}$ [cm]	$P_1$ [psi]	$P_2$ [psi]	$P_1^2 - P_2^2$ [ $10^9 \text{ Pa}^2$ ]	$\frac{x_s}{\rho \cdot Q/\mu \cdot h}$ [-]	$\frac{y_s}{Z \cdot R \cdot T \cdot \mu \cdot \rho \cdot L \cdot Q}$ [ $10^{12} \text{ l/m}^3$ ]	$\frac{a_s}{\beta W_{fp}^2}$ [ $10^9 \text{ l/m}^3$ ]	$\frac{b_s}{1/k_{fp} \cdot W_{fp}}$ [ $10^{12} \text{ l/m}^2 \cdot \text{m}$ ]	$R^2$ [-]	$W_{fp}$ [cm]	$k_{fp} \cdot W_{fp}$ [ $10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ ]	$k_{fp}$ [ $10^{-12} \text{ m}^2$ ]
36	4,02	0,5690	50,34	50,05	1,4030	112,60	1,770						
	6,02	0,5690	50,50	50,04	2,2280	168,50	1,878						
	8,01	0,5690	50,61	49,96	3,1480	224,20	1,994						
	10,01	0,5690	50,82	49,95	4,1500	280,00	2,105						

Tablica 2. Dane pomiarowe oraz rezultaty testu uszkodzonej płynem szczelinującym pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla zawilgoconego (gazu) azotu po oczyszczeniu szczeliny azotem z wydatkiem 2 l/min przez okres 2 godzin, test nr 2, w  $80^\circ\text{C}$  [17]

Czas [godz.]	Wydatek przepływu [l/min]	$W_{fu}$ [cm]	$P_1$ [psi]	$P_2$ [psi]	$P_1^2 - P_2^2$ [ $10^9 \text{ Pa}^2$ ]	$\frac{x_s}{\rho \cdot Q/\mu \cdot h}$ [-]	$\frac{y_s}{Z \cdot R \cdot T \cdot \mu \cdot \rho \cdot L \cdot Q}$ [ $10^{12} \text{ l/m}^3$ ]	$\frac{a_s}{\beta W_{fu}^2}$ [ $10^9 \text{ l/m}^3$ ]	$\frac{b_s}{1/k_{fu} \cdot W_{fu}}$ [ $10^{12} \text{ l/m}^2 \cdot \text{m}$ ]	$R^2$ [-]	$W_{fu}$ [cm]	$k_{fu} \cdot W_{fu}$ [ $10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ ]	$k_{fu}$ [ $10^{-12} \text{ m}^2$ ]
36	4,11	0,5652	50,42	49,98	2,064	115,10	2,546						
	6,14	0,5654	50,68	50,01	3,210	171,70	2,655						
	8,09	0,5656	50,98	50,03	4,582	226,40	2,873						
	10,08	0,5656	51,30	50,03	6,131	281,90	3,089						



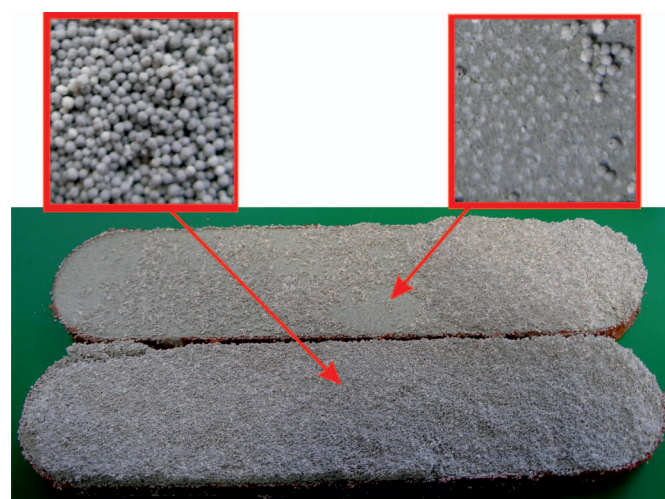
Rys. 7. Wielkości charakterystyczne dla odbudowy uszkodzonej polimerem liniowym pierwotnej przewodności podsadzki dla zawilgoconego gazu (azotu) po dwugodzinnym oczyszczaniu szczeliny gazem przy przepływie 2 l/min, po 36 godzinach oddziaływania zadanego naprężenia ściskającego, w 80°C (zestawienie testów 1 i 2)

warstwy podsadzki przez przepływający gaz (azot). Po 36 godzinach oddziaływania naprężenia ściskającego rozpoczęto pomiar przewodności warstwy podsadzki.

Przewodność była wyznaczana dla średnich arytmetycznych wartości uzyskiwanych dla kilku różnych wydatków tłoczonego do szczeliny azotu, tj. 2, 4, 6, 8 i 10 SLPM (tj. l/min w warunkach standardowych), dla ustabilizowanych warunków przepływu zawilgoconego azotu. Azot tłoczono do szczeliny przy zadanej wartości przeciwności tak, aby w szczelinie utrzymywana była stała wartość ciśnienia  $P_2$  rzędu 0,35 MPa (tj. 50,00 psi) [17]. Wyniki testów 1 i 2 zostały przedstawione w tablicach 1 i 2 oraz na rysunkach 7 i 8.

Na rysunku 8, w lewej czerwonej ramce, zaprezentowano wygląd ziaren materiału podsadzkowego. W prawej czerwonej ramce przedstawiono wgniczenia ziaren podsadzki w skałę (ścianę szczeliny), tzw. zjawisko *embedment*, występujące po oddziaływaniu zadanego naprężenia ściskającego.

Niepewność wyznaczenia wartości pochodzących z pomiarów bezpośrednich została oszacowana na podstawie



Rys. 8. Wygląd uszkodzonej przez płyn szczelinujący warstwy podsadzki umieszczonej pomiędzy dwoma kształtkami skalnymi Ohio po teście nr 2 w 80°C [17]

dokładności urządzeń pomiarowych:  $w_f = \pm 0,001 \text{ cm}$ ,  $P = \pm 0,05 \text{ psia}$ ,  $T = \pm 0,1^\circ\text{C}$ ,  $Q = \pm 0,08 \text{ l/min}$ .

### Podsumowanie i wnioski

Na potrzeby wykonania badań laboratoryjnych dostosowano istniejące stanowisko *Proppant Conductivity Unit* do badań przewodności materiału podsadzkowego za pomocą zawilgoconego gazu (azotu). Opracowano również metodykę badawczą, która została wykorzystana do przeprowadzenia laboratoryjnych badań wielkości odbudowy pierwotnej przewodności dla uszkodzonej przez płyn szczelinujący

warstwy podsadzki, przy przepływie zawilgoconego gazu (azotu). Zjawisko takie ma miejsce po wykonanym zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów. Wartość uzyskanej pierwotnej przewodności dla nieuszkodzonej płynem warstwy lekkiej podsadzki ceramicznej o rozmiarze ziaren  $600 \div 300 \text{ mm}$  (w teście 1), przy koncentracji powierzchniowej  $9,76 \text{ kg/m}^2$ , w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  była



równa  $651,17 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ . Czas oddziaływania naprężenia ściskającego rzędu 41,4 MPa na warstwę podsadzki wynosił 36 godzin. Rozwartość podsadzanej szczeliny po tym czasie była równa 0,5690 mm. Natomiast przewodność uszkodzonej polimerem liniowym warstwy podsadzki, wstępnie oczyszczonej poprzez dwugodzinny przepływ przez nią zawilgoconego gazu (azotu) z wydatkiem 2 l/min (w teście 2), w temperaturze 80°C wynosiła  $425,54 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{m}$ . Czas oddziaływania naprężenia ściskającego rzędu 41,4 MPa na uszkodzoną płynem warstwę podsadzki wynosił 36 godzin.

Rozwartość podsadzanej szczeliny po tym czasie była równa 0,5658 mm. Wielkość uszkodzenia pierwotnej przewodności warstwy podsadzki dla przepływu zawilgoconego gazu (azotu) wynosiła 34,6%, natomiast wielkość jej odbudowy po dwugodzinnym przepływie zawilgoconego gazu (azotu): 65,4%. Wyniki badań mogą być podstawą opracowania wstępnej oceny wielkości uszkodzenia pierwotnej przewodności warstwy materiału podsadzkowego dla zawilgoconego gazu (azotu) po wykonaniu zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2017, nr 3, s. 177–186, DOI: 10.18668/NG.2017.03.05

Artykuł nadesłano do Redakcji 1.12.2016 r. Zatwierdzono do druku 25.01.2017 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Badania odbudowy przewodności szczeliny wypełnionej podsadzką po zabiegach hydraulicznego szczelinowania* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0033/KS/16, nr archiwalny: DK-4100-33/16.

## 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] Czupski M.: *Zastosowanie mikroemulsji jako składnika poprawiającego sprawność płynów szczelinujących i odbiór cieczy po wykonanym zabiegu*. Nafta-Gaz 2012, nr 3, s. 171–179.
- [3] Czupski M. i zespół: *Zastosowanie mikroemulsji jako składnika poprawiającego sprawność płynów szczelinujących i odbiór cieczy po wykonanym zabiegu*. Praca statutowa INiG, nr zlecenia 27/KS/11, nr archiwalny KSW-4100-27/11, Kraków, październik 2011, s. 2–3.
- [4] Czupski M., Kasza P., 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. 1–40.
- [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.: *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 110451, 2007, s. 1–6.
- [8] Kasza P.: *Zabiegi stymulacji wydobywania 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, nr zlecenia 1269/KS/11, nr archiwalny DK-4100-112/11, Krosno, grudzień 2011, s. 22–47.
- [10] Kasza P., Czupski M., Biały E.: *Nowe technologie stymulacji wydobywania 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 133456, 2010, s. 1–50.
- [12] Masłowski M.: *Badania przewodności warstwy materiału podsadzkowego dla gazu (azotu) po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2016, nr 3, s. 177–185.
- [13] Masłowski M.: *Badania zjawiska wciskania ziaren materiału podsadzkowego w ściany szczeliny po zabiegu hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2015, nr 7, s. 461–471.
- [14] Masłowski M.: *Materiały podsadzkowe do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2014, nr 2, s. 75–86.
- [15] Masłowski M., Czupski M.: *Podstawowe właściwości materiałów podsadzkowych stosowanych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż węglowodorów*. Przegląd Górniczy 2014, nr 12, s. 44–50.
- [16] 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. 1–53.
- [17] Masłowski M., Kasza P., Czupski M., Biały E., Wilk K., Stachowicz A., Moska R.: *Badania odbudowy przewodności szczeliny wypełnionej podsadzką po zabiegach hydraulicznego szczelinowania*. Praca statutowa INiG – PIB, nr zlecenia 33/KS/16, nr archiwalny DK-4100-33/16, Krosno, listopad 2016, s. 1–84.
- [18] 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. 1–53.
- [19] 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 – PIB, nr zlecenia 33/KS/15, nr archiwalny DK-4100-33/15, Krosno, wrzesień 2015, s. 1–74.
- [20] 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.
- [21] Palish T.T., Vincent M.C., Handren P.J.: *Slickwater Fracturing – food for thought*. SPE 115766, 2008, s. 1–20.
- [22] 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* 2010, vol. 70, s. 107–117.

- [23] Zhu Ding: *Advanced hydraulic fracturing technology for unconventional tight gas reservoirs*. Project no. 07122-33 Research Partnership to Secure Energy for America, Texas 01.08.2012, s. 39–41.

**Akty prawne i normatywne**

- [24] 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, s. 28.
- [25] 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, s. 5.
- [26] 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.

- [27] 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 (ISO 13503-2:2006)*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, styczeń 2010.
- [28] Polska Norma PN-EN ISO 13503-5: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Materiały i płyny do dowiercania złóż – Część 5: Procedury pomiaru długotrwałej przewodności materiałów*.



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

**OFERTA**

**ZAKŁAD STYMULACJI WYDOBYCIA WĘGLOWODORÓW**

Zakres działania:

- przygotowywanie receptur i badania płynów zabiegowych do stymulacji wydobycia ropy i gazu;
- symulacje przepływów i badania reologiczne w skali półtechnicznej;
- badania materiałów podsadzkowych;
- badania przewodności szczeliny w zależności od użytego materiału podsadzkowego i płynu zabiegowego;
- symulacje usuwania uszkodzenia strefy przydwiertowej;
- oznaczanie współczynnika przepuszczalności i porowatości skał, kamienia cementowego, betonu itp.;
- dobór środków regulujących właściwości reologiczne płynów (SPCz, polimery itp.);
- badania szybkości reakcji skał złożowych z cieczami kwasującymi;
- laboratoryjne symulacje zabiegów kwasowania w warunkach złożowych;
- wykonywanie projektów technologicznych zabiegów stymulacji;
- analiza testów miniszczelinowania i analiza pozabiegowa;
- laboratoryjne symulacje metod wspomagających wydobycie węglowodorów;
- badania zjawisk korozyjnych występujących w górnictwie naftowym;
- dobór ochrony inhibitorowej zapobiegającej zjawiskom korozyjnym.



**Kierownik:** dr inż. Piotr Kasza  
**Adres:** ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno  
**Telefon:** 13 436 89 41 w. 5229  
**Faks:** 13 436 79 71  
**E-mail:** [piotr.kasza@inig.pl](mailto:piotr.kasza@inig.pl)

