

Improving the injectivity of boreholes in depleted oil and gas fields for geothermal energy acquisition

Poprawa chłonności otworów w wyeksploatowanych złożach ropnych i gazowych na potrzeby pozyskania energii geotermalnej



DOI: 10.15199/62.2025.2.11

On the example of 2 deposits in Poland, the concepts of one- and 2-stage matrix acidizing treatments were presented to increase permeability both in the near-well zone and further away from the well. Seven samples were taken from each of the 2 lithographic areas and subjected to flow acidizing tests in laboratory conditions using acidizing fluids of different compn. Based on these tests and numerical calcns., the compn. of treatment fluids, their volumes as well as calc. pumping rate were detd. The optimal fluid compns. characterized by high efficiency and safe of use were indicated as org. acid and chelates for the carbonate formation and CH_3COOH and NH_4Cl as a preflush fluid, and a mixt. of HCl and HF as the main acidizing fluid for the sandstone formation.

Keywords: depleted reservoirs, geothermal energy, acidizing, core-flow testing, numerical simulation

Zakończenie produkcji węglowodorów z danego złoża wiąże się z likwidacją odwiertów na jego obszarze oraz z przywróceniem terenu do stanu sprzed eksploatacji. Zazwyczaj odbywa się to poprzez uszczelnienie odwiertu z zastosowaniem korka cementowego oraz zrehabilitowanie lokalizacji na powierzchni. Jest to proces kompleksowy i kosztowny, nieprzynoszący zwrotu finansowego, a w dłuższej perspektywie mogący powodować problemy w przypadku rozszechnienia i przedostania się metanu do atmosfery¹⁾.

Zaproponowano rozwiązania zwiększające chłonność odwiertów ropnych i gazowych, które potencjalnie mogą być wykorzystane na potrzeby pozyskania energii geotermalnej. Na przykładzie dwóch odmiennych litologicznie obszarów złożowych na terenie Polski przedstawiono koncepcje zabiegów jedno- i dwuetapowego kwasowania matrycowego w celu zwiększenia przepuszczalności zarówno w strefie przyotworowej, jak i w dalszej odległości od otworu. Wyniki laboratoryjnych testów przepływowych na rdzeniach wiertniczych oraz symulacji numerycznych pozwoliły dobrać skład cieczy zabiegowych, ich objętość oraz wydajność pompowania. Wskazano optymalne składniki cieczy cechujące się wysoką efektywnością i bezpieczeństwem stosowania: ciecz na bazie kwasu organicznego i chelatów dla formacji węglanowej, ciecz wyprzedzającą na bazie kwasu octowego i chlorku amonu oraz mieszaninę kwasu solnego i fluorowodorowego jako ciecz główną dla formacji piaskowcowej.

Słowa kluczowe: wyeksploatowane złoża, energia geotermalna, kwasowanie, testy przepływowe, symulacje numeryczne

W ostatnich latach coraz śmielej podejmowane są działania zmierzające do wykorzystania otworów na wyeksploatowanych złożach naftowych w celach sekwestracji CO_2 lub pozyskiwania energii geotermalnej²⁻⁴⁾. Sekwestracja CO_2 wiąże się z niepewnością dotyczącą integralności odwiertu, a także szczelności górotworu⁵⁻⁹⁾. Jednocześnie obserwowany rozwój i zwiększenie efektywności pozyskiwania energii z geotermalnych źródeł niskotemperaturowych skłaniają do zainteresowania wykorzystaniem odwiertów na wyeksplo-



Mgr Rafał MOSKA (ORCID: 0000-0002-6353-9287) w roku 2012 ukończył studia na kierunku geologia, a w 2013 r. na kierunku geofizyka na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego. Jest starszym specjalistą badawczo-technicznym w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym. Specjalność – intensyfikacja wydobycia węglowodorów.



Dr inż. Marek CZUPSKI (ORCID: 0000-0002-6151-8044) w roku 1997 ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. W 2008 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Jest kierownikiem Zakładu Stymulacji Wydobycia Węglowodorów Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego w Krakowie. Specjalność – intensyfikacja wydobycia węglowodorów.

*** Adres do korespondencji:**

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno, tel.: (13) 436-89-41 wew. 5133, fax: (13) 436-79-71, e-mail: moska@inig.pl

atowanych złożach naftowych do celów pozyskania ciepła Ziemi^{1, 10, 11}). Rozwijane są także technologie geotermalnych systemów zamkniętych (*closed loop*), w których woda krąży w obrębie jednego odwiertu w zamocowanych współosiowo rurach, przez co nie ma kontaktu ze skałą, a wymiana ciepła zachodzi jedynie przez kondukcję pomiędzy gorącą skałą a orurowaniem^{12, 13}).

Formacje zbiornikowe ropy i gazu są najczęściej bardzo dobrze rozpoznane pod względem parametrów geologicznych, petrofizycznych oraz eksploatacyjnych, co jest niepodważalną zaletą w kontekście ich wykorzystania do celów geotermalnych. Jednakże wieloletnia eksploatacja węglowodorów, jak również prace wykonywane w odwiertach mogą spowodować niekorzystne zmiany w górotworze. Zjawiska, takie jak wytrącanie się osadów organicznych i nieorganicznych, zmiany zwilżalności formacji, powstawanie blokad wodnych, pęcznienie minerałów ilastych, a także filtracja płuczek oraz cementów w formację powodują kolmatację i w konsekwencji pogorszenie przepuszczalności w strefie przyodwiertowej^{14–16}.

Metodą najczęściej stosowaną w celu usunięcia uszkodzenia stref przyodwiertowych w złożach ropnych i gazowych o średniej i wysokiej przepuszczalności jest kwasowanie matrycowe. W formacjach węglanowych kwas rozpuszcza skałę sąsiadującą ze strefą uszkodzoną, w sposób niejednorodny tworząc otwory robaczkowe, w obrębie których przepuszczalność wzrasta o kilka rzędów wielkości. W formacjach piaskowcowych zawierających poniżej 20% węglanów zabiegi kwasowania wykonuje się zazwyczaj w dwóch etapach. Najpierw zatłaczana jest ciecz wyprzedzająca, której celem jest rozpuszczenie węglanów. Po niej następuje tłoczenie głównej cieczy kwasującej, którą stanowią zazwyczaj mieszaniny HCl i HF w różnych proporcjach. HF rozpuszcza minerały ilaste oraz krzemionkę, natomiast HCl utrzymuje niskie pH mieszaniny, zapobiegając wytrącaniu się osadów poreakcyjnych^{14, 17}.

W odwiertach geotermalnych kwasowania matrycowe wykonuje się w celu zwiększenia wydajności lub chłonności odwiertów^{18, 19}. Zabiegi takie, prowadzone za pomocą HCl, HCl + HF, chelatów i kwasu cytrynowego z dodatkami, były również wykonywane w systemach geotermalnych typu wspomaganego EGS (*enhanced geothermal systems*), np. w Soultz-sous-Forêts i Landau^{20–22}). Stymulację z udziałem kwasu glutaminowego i acetylooctowego stosowano z powodzeniem w Rittershoffen²³). W dolnopermskich pia-

skowcach w projekcie Groß Schönebeck stosowano HCl w celu rozpuszczenia pozostałości płuczki²⁴).

W artykule przedstawiono rozwiązania zwiększające chłonność odwiertów ropnych i gazowych, które potencjalnie mogłyby być wykorzystane do celów geotermalnych, na przykładzie dwóch odmiennych litologicznie obszarów złożowych na terenie Polski. Zaprezentowane zostały wyniki badań laboratoryjnych przepływowych na rdzeniach wiertniczych oraz symulacji numerycznych procesu kwasowania matrycowego. Zaproponowano technologie jedno- i dwuetapowego kwasowania, zwiększającego przepuszczalność zarówno w strefach kolmatacji, jak i w dalszej odległości od otworów.

Część doświadczalna

Materiały

Badania były wykonywane na próbkach skalnych otrzymanych z dwóch formacji odmiennych litologicznie i stratygraficznie: wizeńskich wapieni Karpackiego (złoża A) oraz piaskowców Czerwonego Spągowca ze wschodniej części Monokliny Przedsubdeckiej (złoża B)²⁵). Z rdzeni wiertniczych z perspektywicznych interwałów produkcyjnych wycięto próbki w formie walców o średnicy 25,4 mm i długości 40–60 cm (rys. 1), dla każdego ze złożów po 7 próbek.



Fig. 1. An example of rock samples used for studies: limestone from A deposit (on the left), sandstone from B deposit (on the right)

Rys. 1. Przykładowe próbki skalne wykorzystane do badań: wapień ze złoża A (z lewej), piaskowiec ze złoża B (z prawej)

Wyznaczono podstawowe parametry petrofizyczne próbek, czyli współczynnik przepuszczalności absolutnej dla azotu oraz współczynnik porowatości efektywnej (tabela 1).

Table 1. Selected petrophysical parameters of measured samples

Tabela 1. Wybrane parametry petrofizyczne badanych próbek

Parametr		Złoża A, węglany (wapień)	Złoża B, piaskowce
Współczynnik przepuszczalności absolutnej, mD	minimum	< 0,001	21,490
	maksimum	0,110	419,790
	średnia	0,029	186,177
	odchylenie standardowe	0,045	162,377
Współczynnik porowatości efektywnej, %	minimum	0,48	18,70
	maksimum	0,63	26,20
	średnia	0,55	23,43
	odchylenie standardowe	-	2,61



Dr inż. Mateusz MASŁOWSKI (ORCID: 0000-0003-1181-8804) w roku 2003 ukończył studia na kierunku górnictwo i geologia na Wydziale Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie, specjalność gazownictwo ziemne. W 2022 r. uzyskał stopień doktora nauk inżynijno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jest adiunktem w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym. Specjalność – intensyfikacja wydobycia węglowodorów oraz korozja.

W złożu A przepływ do odwiertów wydobywczych występuje przez sieć naturalnych szczelin o przepuszczalności rzędu 25–27 mD, a przepływ przez matrycę, ze względu na jej bardzo małą przepuszczalność, jest pomijalnie mały (tabela 1). Próbkę rdzeniową z tego złoża rozcięto więc wzdłużnie tak, aby uzyskać formę sztucznej szczeliny (rys. 1). Na podstawie pomiarów 2D mikroskopii optycznej wyznaczono średnią rozwarłość szczeliny (0,018 mm) oraz obliczono średnią objętość szczeliny dla każdej próbki.

Metodyka badań

Badania przepływowe na rdzeniach wiertniczych

Badania przepływowe wykonywano za pomocą urządzenia AFS-300 Coreflooding system. Dla złoża A zaprojektowano następujący schemat jednoetapowego kwasowania matrycowego: (i) ciecz wyprzedzająca (*preflush*), pomiar przepuszczalności referencyjnej za pomocą 2-proc. KCl, (ii) ciecz kwasująca i (iii) ciecz wytłaczająca (*overflush*), pomiar przepuszczalności końcowej za pomocą 2-proc. KCl. Do testów wytypowano komercyjnie dostępne ciecze A1 i A2, będące mieszaninami kwasu nieorganicznego oraz środków chelatujących z inhibitorami korozji, z których każda tłoczona była z dwoma prędkościami liniowymi wynoszącymi 43,7 cm/min i 87,4 cm/min.

Dla złoża B przygotowano schemat dwuetapowego kwasowania matrycowego: (i) ciecz wyprzedzająca (*preflush*), pomiar przepuszczalności referencyjnej za pomocą 5-proc. NH_4Cl , (ii) ciecz kwasująca wyprzedzająca, (iii) główna ciecz kwasująca i (iv) ciecz wytłaczająca (*overflush*), pomiar przepuszczalności końcowej za pomocą 5-proc. NH_4Cl .

Przetestowano 2 wyprzedzające ciecze kwasujące: B1 na bazie 13-proc. CH_3COOH i 5-proc. NH_4Cl oraz B2 na bazie 7,5-proc. HCl z dodatkiem reduktora jonów żelaza i inhibitora minerałów ilastych.

Przetestowano także 3 ciecze główne: B3 na bazie 12-proc. HCl i 1,5-proc. HF (otrzymany z 30-proc. NH_4F i 16-proc. HCl) z reduktorem jonów żelaza, B4 na bazie 9-proc. CH_3COOH i 1,5-proc. HF (otrzymany z 30-proc. NH_4F i 13-proc. CH_3COOH) i B5 na bazie 5-proc. CH_3COOH i 3-proc. HF (otrzymany z 30-proc. NH_4F i 13-proc. CH_3COOH).

Do wszystkich cieczy dodawano także inhibitory korozji oraz ich intensyfikatory. Badania prowadzono w temperaturze złożowej 102°C i 112°C dla złóż odpowiednio A i B.

Numeryczne symulacje poprawy chłonności odwiertów

Symulacje zabiegów kwasowania wykonano za pomocą oprogramowania Carboceramics StimPro. Do zaprojektowania modeli ośrodków wykorzystano dane z dokumentacji wynikowych analizowanych otworów, przede wszystkim dotyczące konstrukcji uzbrojenia wgłębnego, głębokości zalegania i litologii poszczególnych formacji skalnych,

a także ich parametrów petrofizycznych, czyli współczynnika przepuszczalności oraz współczynnika porowatości efektywnej. Wykorzystano także dane petrofizyczne otrzymane na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych na rdzeniach wiertniczych. Dla złoża A przygotowano 9 wariantów zabiegu kwasowania jednoetapowego, przy czym analizowano 3 objętości całkowite cieczy kwasującej: 21, 73 oraz 125 m³ oraz zróżnicowane wydajności pompowania cieczy kwasującej i wytłaczającej. Dla złoża B wykonano 7 wariantów zabiegów kwasowania dwuetapowego dla różnych objętości poszczególnych cieczy w etapach oraz schematów pompowania uwzględniających zarówno standardową procedurę tłoczenia kwasu wyprzedzającego oraz kwasu głównego po nim, jak i naprzemienne tłoczenie tych kwasów.

Wyniki badań

Złoże A

Przepuszczalności pierwotne próbek ze sztuczną szczeliną wahały się w granicach 70–900 D. Wszystkie testowane ciecze zabiegowe w znaczny sposób wytrawiły powierzchnię szczeliny, znacznie zwiększając przepuszczalność modelu. W każdym z przeprowadzonych testów ciśnienie różnicowe dP po wytrawieniu szczeliny nie przekraczało minimalnej wartości rejestrowanej przez przetwornik dP, co spowodowało, że wyznaczenie przepuszczalności szczeliny po wytrawieniu oraz wskaźników stymulacji *SI* (stosunek współczynnika przepuszczalności po kwasowaniu do współczynnika przepuszczalności przed kwasowaniem) nie było możliwe. Na podstawie oceny makroskopowej stwierdzono, że ciecz A1 powo-

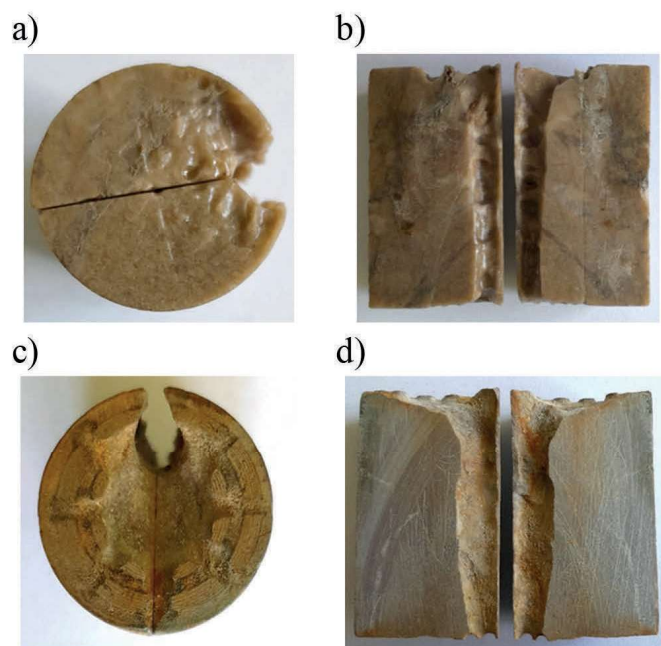


Fig. 2. Inlet surfaces and fracture cross-sections after acidizing treatment: a), b) A1 liquid, c), d) A2 liquid

Rys. 2. Powierzchnie czołowe oraz przekroje szczelin po zabiegach kwasowania: a, b) ciecz A1, c, d) ciecz A2

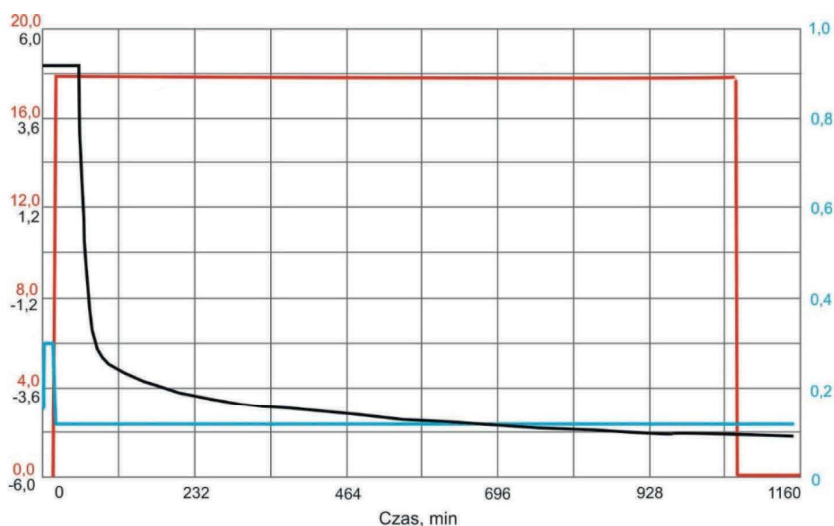


Fig. 3. Selected treatment parameters obtained in acidizing numerical modelling for A deposit; curves: red – acid concentration, % by mass; blue – pumping flow rate, m³/min; black – skin effect, dimensionless

Rys. 3. Wybrane parametry zabiegowe podczas modelowania numerycznego zabiegu kwasowania na złożu A; krzywa czerwona – koncentracja cieczy kwasującej, % mas.; niebieska – wydajność pompowania, m³/min; czarna – wskaźnik skin, bezwymiarowy

Table 2. Summary of permeability coefficients before and after treatment and stimulation indexes for the tested acid compositions

Tabela 2. Zestawienie współczynników przepuszczalności k przed i po zabiegu oraz wskaźników stymulacji dla testowanych kompozycji cieczy

Nr testu	Ciecz	k przed kwasowaniem, mD	k po kwasowaniu, mD	Wskaźnik stymulacji SI
1	Wyprzedzająca B1 główna: B3	7,49	413,47	55,22
2	Wyprzedzająca: B1 główna: B4	12,71	15,18	1,19
3	Wyprzedzająca: B1 główna: B5	3,42	4,02	1,18
4	Wyprzedzająca: B2 główna: B3	90,68	171,41	1,89

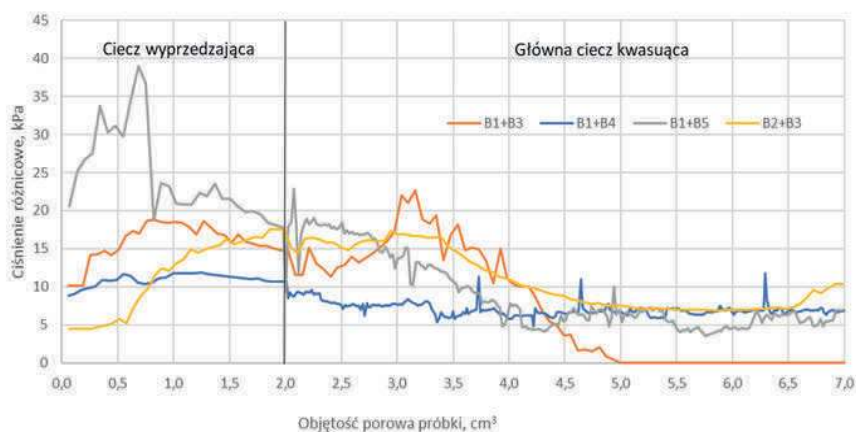


Fig. 4. Differential pressure during laboratory matrix acidization experiment on samples from deposit B

Rys. 4. Ciśnienie różnicowe uzyskiwane podczas laboratoryjnych symulacji kwasowania matrycowego na próbkach ze złoża B

dowała mniejsze wytrawienie materiału z powierzchni czołowej rdzenia, a szczelina miała mniejszą rozwartość (rys. 2). Sugeruje to wolniejszą reakcję cieczy z węgl-

nami. Z kolei ciecz A2 powodowała znacznie większe wytrawienie powierzchni czołowej rdzenia, zarówno przy większej, jak i mniejszej prędkości tłoczenia. Zatem z punktu widzenia efektywności udroźnienia strefy przyotworowej wydaje się, że korzystniejszy sposób reakcji ze skałą wykazywała ciecz A1, która w danych warunkach złożowych charakteryzowała się wolniejszą reakcją z minerałami formacji. Ma to niebagatelne znaczenie, ponieważ pozwala na bardziej elastyczne prowadzenie zabiegów kwasowania zarówno przy małych, jak i większych wydajnościach tłoczenia. Większe wydajności, a więc i prędkości przepływu cieczy będą sprzyjać transportowi nieprzereagowanego kwasu na dalsze odległości od odwiertu i udrażnianiu występującego tam systemu szczelin. Powinno to znacznie poprawić chłonność odwiertów poddanych tego typu zabiegom.

Najniższy wskaźnik skin (-4,89), świadczący o największym polepszeniu przepuszczalności skał w badanej strefie, uzyskano dla wariantu zabiegu, w którym zastosowano największą objętość cieczy kwasującej (125 m³), przy wydajności tłoczenia 0,30 m³/min dla cieczy wyprzedzającej, 0,12 m³/min dla cieczy kwasującej oraz 0,12 m³/min dla cieczy wytłaczającej (rys. 3). Najniższy wskaźnik skin odpowiadał w tym przypadku najgłębszej inwazji kwasu w formację, czyli ok. 480 cm od odwiertu.

Złoże B

Najwyższy wskaźnik stymulacji SI (55,22), a zatem największą poprawę przepuszczalności matrycy po kwasowaniu względem przepuszczalności pierwotnej, uzyskano podczas testu z zastosowaniem cieczy wyprzedzającej B1 oraz cieczy głównej B3 (tabela 2). Przepuszczalność dla 5-proc. NH₄Cl zwiększyła się w tym przypadku z 7,49 mD do ponad 400 mD, przy czym próbka rdzeniowa nie uległa tzw. piaszczeniu, czyli dekonsolidacji. Podczas kwasowania spadek ciśnienia różnicowego do wartości poniżej dolnego zakresu pomiarowego osiągnięto po przetłoczeniu 2,0 obj. porowych cieczy wyprzedzającej i 3,0 obj. porowych cieczy głównej (rys. 4). Zastosowanie cieczy wyprzedzającej B2 oraz głównej B3 pozwoliło otrzymać wskaźnik SI na poziomie 1,89. Przepuszczalność próbki w tym teście, pierwotnie wynosząca nieco ponad 90 mD, zwiększyła się do ponad 171 mD. Dla pozostałych testów, w których cieczą wyprzedzającą był 13-proc. roztwór CH₃COOH oraz 5-proc. roztwór NH₄Cl,

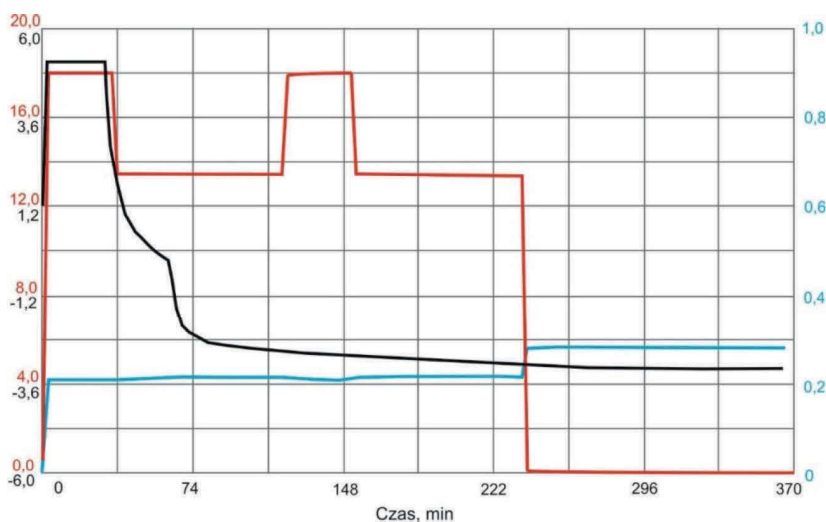


Fig. 5. Selected treatment parameters obtained in acidizing numerical modelling for B deposit; curves: red – acid concentration, % by mass; blue – pumping flow rate, m^3/min ; black – skin effect, dimensionless

Rys. 5. Wybrane parametry zabiegowe podczas modelowania numerycznego zabiegu kwasowania na złożu B; krzywa czerwona – koncentracja cieczy kwasujacej, % mas.; niebieska – wydajnosć pompowania, m^3/min ; czarna – wskaźnik skin, bezwymiarowy

a cieczą główną kwas octowy oraz kwas fluorowodorowy wytworzony z fluorku amonu, wskaźnik stymulacji *SI* wynosił 1,18–1,19. Najniższy wskaźnik skin w przeprowadzonych symulacjach numerycznych (–3,17) uzyskano dla wariantu, w którym zastosowano naprzemienne tłoczenie cieczy wyprzedzającej i głównej oraz największą w porównaniu z pozostałymi analizowanymi wariantami ilość cieczy wytłaczającej (37,0 m^3) (rys. 5). Najniższy wskaźnik skin odpowiadał również najgłębszej inwazji kwasu w formację, czyli ok. 3,40 m.

Podsumowanie

Analizowane formacje w dwóch obszarach złóż naftowych mogących być potencjalnie wykorzystane do pozyskiwania energii geotermalnej charakteryzują się dobrą przepuszczalnością. W przypadku obszaru A główny system szczelin w węglanach ma przepuszczalność średnią rzędu 25–27 mD. Piaskowce złoża B charakteryzują się przepuszczalnością średnią matrycy rzędu 55 mD.

Na podstawie testów przepływowych wykonanych na rdzeniach wiertniczych z analizowanych obszarów przygotowano optymalne receptury cieczy zabiegowych. Dla obszaru A zaprezentowano schemat zabiegu jednoetapowego za pomocą mieszaniny kwasu nieorganicznego, chelatów i dodatków, która powinna umożliwić udrożnienie systemu szczelin nie tylko w bezpośrednim sąsiedztwie otworu, ale także w dalszej odległości od niego. Najniższy, a więc najbardziej pożądany wskaźnik skin uzyskano w wariacie zabiegu, w którym zastosowano największą objętość cieczy kwasującej w porównaniu z pozostałymi analizowanymi wariantami.

Dla obszaru B przygotowano schemat zabiegu dwuetapowego, gdzie cieczą wyprzedzającą jest 13-proc. kwas

octowy i 5-proc. roztwór chlorku amonu, a cieczą główną 12-proc. kwas solny i 1,5-proc. kwas fluorowodorowy wygenerowany w złożu z roztworu 30-proc. fluorku amonu i 16-proc. kwasu solnego. Taka kompozycja cieczy wykazuje wysoką skuteczność poprawy chłonności oraz dodatkowo zwiększa bezpieczeństwo pracowników podczas prac przygotowawczych związanych z wykonaniem zabiegu. Najniższy wskaźnik skin uzyskano w wariacie, w którym zastosowano naprzemienne tłoczenie cieczy wyprzedzającej i głównej oraz największą, w porównaniu z pozostałymi analizowanymi wariantami, objętość cieczy wytłaczającej.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego pt. „Analiza możliwości pozyskiwania energii geotermalnej ze złóż naftowych”, zleconej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego; nr zlecenia 0052/SG/2022.

Otrzymano: 04-12-2024

Zrecenzowano: 21-12-2024

Zaakceptowano: 09-01-2024

Opublikowano: 20-02-2025

LITERATURA

- [1] L. Santos, A. Dahi Taleghani, D. Elsworth, *Renew. Energy* 2022, **194**, 1288.
- [2] M. Zhang, S. Bachu, *Int. J. Greenh. Gas Control* 2011, **5**, nr 4, 826.
- [3] R.A. Caulk, I. Tomac, *Renew. Energy* 2017, **112**, 388.
- [4] F. M. Orr, *SPE J.* 2018, **23**, nr 6, 2444.
- [5] B.L. Alemu, E. Aker, M. Soldal, Ø. Johnsen, P. Aagaard, *Energy Procedia* 2011, **4**, 4379.
- [6] W.A. AL-Ameri, A. Abdullaheem, M. Mahmoud, *J. Energy Resour. Technol.* 2016, **138**, nr 1, 012201.
- [7] J. Zhou, K. Yang, L. Zhou, Y. Jiang, X. Xian, C. Zhang, S. Tian, M. Fan, Z. Lu, *J. Pet. Sci. Eng.* 2021, **196**, 108088.
- [8] A. Fatah, H. Ben Mahmud, Z. Bennour, R. Gholami, M. Hossain, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2022, **98**, 104394.
- [9] R. Moska, *Nafta-Gaz* 2024, **3**, 139.
- [10] X. Bu, W. Ma, H. Li, *Renew. Energy* 2012, **41**, 80.
- [11] D. Sui, E. Wiktorski, M. Røksland, T.A. Basmoen, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 2019, **9**, nr 2, 1135.
- [12] A. Van Horn, A. Amaya, B. Higgins, J. Muir, J. Scherer, R. Pilko, M. Ross, *GRC Trans.* 2022, **44**, 1123.
- [13] A. Amaya, H. Chandrasekar, S. Molina, S. Brown, J. Scherer, Proceedings 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 12–14, 2024.
- [14] L. Kalfayan, *Production enhancement with acid stimulation*, Wyd. Penn Well, Tulsa 2008.
- [15] S. Schumacher, R. Schulz, *Geotherm. Energy Sci.* 2013, **1**, nr 1, 1.
- [16] M. Czupski, P. Kasza, *Prace Nauk. INiG-PIB* 2017, nr 218.
- [17] M. Economides, K. Nolte, *Reservoir stimulation*, Wiley & Sons, Chichester 2000.
- [18] S. Portier, L. Andre, F-D. Vuataz, Review on chemical stimulation techniques in oil industry and applications to geothermal systems, Technical report, 2007, Deep Heat Mining Association, Switzerland.
- [19] K. Wilk-Zajdel, M. Czupski, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 5, 502.
- [20] N. Cuenot, J.P. Faucher, D. Fritsch, A. Genter, D. Szablinski, *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, Pittsburgh 2008.
- [21] S. Portier, F.-D. Vuataz, P. Nami, B. Sanjuan, A. Gérard, *Geothermics* 2009, **38**, nr 4, 349.
- [22] M. Schindler, J. Baumgärtner, T. Gandy, P. Hauffe, T. Hettkamp, H. Menzel, P. Penzkofer, D. Teza, T. Tischner, G. Wahl, *Proc. World Geothermal Congress*, Indonesia, Bali 2010.
- [23] J. Vidal, A. Genter, J. Schmittbuhl, *Geophys. J. Int.* 2016, **206**, nr 2, 845.
- [24] G. Zimmermann, G. Blöcher, A. Reinicke, W. Brandt, *Tectonophysics* 2011, **503**, nr 1–2, 146.
- [25] T. Topór, M. Ślota-Valim, R. Kudrewicz, *Energies* 2023, **16**, nr 13, 5211.