

WYNIKI PRAC I BADAŃ POLOWYCH

Jerzy HADRO, Janusz JURECZKA

TESTY PRODUKCYJNE

Zasadniczym celem testów produkcyjnych w zestawie połączonych otworów wiertniczych Wesoła PIG 1 i Wesoła PIG 2H było sprawdzenie możliwości przedeksplotacyjnego ujęcia metanu z pokładów węgla otworem horyzontalnym wierconym z powierzchni, z jednoczesną oceną wpływu intensyfikacji dopływu metanu (metodą szczelinowania hydraulicznego) na wydajność produkcji metanu. Realizacja tak postawionego celu wymagała przeprowadzenia testów w dwóch seriach – przed zabiegami szczelinowania i po tych zabiegach.

Testy przeprowadzono w zestawie otworów połączonych – otworu pionowego Wesoła PIG 1 zarurowanego kolumną produkcyjną $\varnothing 7''$ oraz nieorurowanego odcinka horyzontalnego otworu kierunkowego Wesoła PIG 2H. Obie serie testów wykonał ten sam wykonawca (firma Exalo Drilling S.A., Centrum Krosno), przy pomocy tego samego wyposażenia wgłębnego i powierzchniowego, a miejscem prowadzenia testów na powierzchni był plac wiertni Wesoła PIG 1.

METODY I PRZEBIEG TESTÓW PRODUKCYJNYCH

Głównym zadaniem przeprowadzenia testów produkcyjnych metanu z pokładów węgla jest umożliwienie oceny warunków dopływu i wielkości produkcji gazu przy ustabilizowanych parametrach przepływowych (stała depresja ciśnienia dennego). Test produkcyjny metanu pokładów węgla polega na pompowaniu odwiertu w taki sposób, aby stabilnie obniżyć ciśnienie wgłębne (poziom płynu w odwiercie) z założonym reżimem pompowym do uzyskania minimalnego ciśnienia wgłębnego – jest to faza odwodnienia, podczas której zostaje zainicjowany dopływ gazu po przekroczeniu krytycznego ciśnienia desorpcji. Następnie pompowanie jest kontynuowane, a jego głównym celem staje się utrzymanie założonego ciśnienia wgłębnego, aby wydzielający się gaz był odbierany w ustabilizowanych warunkach dopływu – faza eksploatacyjna.

W przypadku prowadzenia testów produkcyjnych w zestawie otworów połączonych Wesoła PIG 1 i Wesoła PIG 2H, proces obniżania ciśnienia hydrostatycznego na pokład węgla dokonywał się poprzez pompowanie wody złożowej na powierzchnię przy użyciu pompy wgłębnej (żerdziowej), zapuszczonej do otworu pionowego (Wesoła PIG 1). Podczas fazy odwodniania, po przekroczeniu krytycznego ciśnienia desorpcji i uzyskaniu przepływu dwufazowego (woda z gazem), gaz oddzielał się od wody i przepływał przestrzenią pierścieniową w wyniku naturalnej separacji w otworze pionowym. Wypływający z otworu gaz kierowany był na odcinek pomiarowy, a następnie wypuszczany do atmosfery. Odprowadzana woda była groma-

dzona w szczelnych zbiornikach stalowych, a następnie transportowana cysterną do miejsca utylizacji.

Zestawienie podstawowych informacji technicznych dotyczących wyposażenia wgłębnego i napowierzchniowego zastosowanego do przeprowadzenia testów produkcyjnych zamieszczono w [tabelach 49 i 50](#).

Podział prac związanych z przeprowadzeniem testów produkcyjnych oraz czas trwania poszczególnych etapów przedstawiono w [tabeli 51](#).

Prace przygotowawcze

Przed rozpoczęciem testów na placu wiertni oraz w szybie otworu Wesoła PIG 1 wykonano prace przygotowawcze, rekonstrukcyjne i montażowe, polegające na:

- przystosowaniu placu wiertni do montażu urządzeń i wykonania testów;
- mobilizacji, montażu i odbioru urządzenia wyciągowego W-360/10;
- zapuszczeniu frezera $\varnothing 145$ mm (rury z włókna szklanego szablonowane szablonem o średnicy $\varnothing 148,6$ mm) na rurkach produkcyjnych (przewodzie) $\varnothing 2\frac{3}{8}''$;
- wypłukaniu otworu do wierzchu korka cementowego przy użyciu agregatu pompowego, czas płukania na spodzie – 2 obiegi;
- wyciągnięciu zestawu (przewodu) do wierzchu;

Tabela 49**Wypożyczenie wgłębne do testów produkcyjnych
dopływu metanu**

Downhole equipment used for gas flow testing

Rodzaj urządzenia Type of equipment		Głębokość montażu Depth of installation [m]
Pompa (żerdziowa)	API 20-125 RHAC	987,27
Ciśnieniomierz wgłębny	PIEZO 0,75"	949,80

Tabela 50**Wypożyczenie napowierzchniowe do testów produkcyjnych
dopływu metanu**

Surface equipment used for gas flow testing

Żuraw pompowy IŻP 1000	11 kW
Separator 2,5 m ³ × 10 Bar	R-10
Rura wentylacyjna do odpuszczania gazu	4" × 4,5 m
Zbiornik magazynowy wody	30 m ³
Dodatkowe zbiorniki magazynowe wody	15 m ³ + 1 m ³
Zestaw pomp do przetłaczania płynu	4 kW
Odcinek pomiarowy gazu	
Panel zasilający ciśnieniomierz	

- zapuszczeniu korpusu pompy i manometru wgłębne-
go (zestawu wgłębne $\varnothing$ 2 3/8" API) z łącznikiem
zaczeponym pompy do głębokości:
 - but rur wydobywczych – 996,70 m,
 - łącznik posadowy (zaczepony) pompy N11-20 –
987,27 m,
 - ciśnieniomierz wgłębny – 949,80 m (mocowanie
kabla od manometru wgłębne do rurek produk-
cyjnych $\varnothing$ 2 3/8");
- montażu wieszaka rurek produkcyjnych (gwint wie-
szaka $\varnothing$ 2 7/8" EU);
- instalacji kabla pomiarowego ciśnieniomierza wgłęb-
nego;
- montażu głowicy pompowej;
- zapuszczeniu pompy API 20-125-RHAC na żer-
dziach pompowych $\varnothing$ 3/4" C (mocowanie stabilizato-
rów na żerdziach pompowych);
- montażu napędu pompy – indywidualnego żurawia
pompowego IŻP 1000 – ustawieniu laski pompowej;

- demontażu i demobilizacji urządzenia wyciągowego;
- mobilizacji i montażu urządzeń do testowania od-
wiertu;
- montażu urządzeń i sprzętu napowierzchniowego
zgodnie ze schematem technologicznym;
- testowaniu (próby ciśnieniowe) i kolaudacji urządzeń.

W trakcie prac rekonstrukcyjnych przed rozpoczęciem
pierwszej serii testów w otworze Wesoła PIG 1 wykonano
dodatkowe pomiary geofizyczne w interwale 900,00–
999,40 m mające na celu doprecyzowanie miejsca posado-
wienia rury z włókna szklanego i przecięcia intersekcyjnego.

Przebieg pierwszej serii testów (przed szczelinowaniem)

Po wykonaniu prac rekonstrukcyjnych stwierdzono
ustabilizowanie się poziomu wody w otworze na głęb.
592 m (ciśnienie wgłębne 508 psi, 3,5 MPa) i przystąpiono
do obniżania poziomu lustra wody z prędkością ok. 10 m/dobę.
Regulacja tempa obniżania lustra wody była prowadzona
na podstawie ciągłego odczytu danych z zamontowanego
w szybie otworu ciśnieniomierza wgłębne. Początek do-
pływu gazu zanotowano przy poziomie lustra wody na
głęb. 761 m w piętnastym dniu testów. Obniżanie lustra
wody prowadzono do osiągnięcia stabilizacji na głęb.
ok. 920–930 m (ciśnienie wgłębne ok. 42–35 psi, 0,29–
0,24 MPa). Woda złożowa była pozyskiwana we wzrastają-
cej ilości od ok. 0,5 do 3,0 m³/dobę w czasie pierwszych
dwóch tygodni testów (do czasu dopływu gazu), a następ-
nie w ustabilizowanej ilości ok. 1,5–2,0 m³/dobę. Z kolei,
wypływający z otworu gaz był wydobywany w ilości po-
czątkowo wzrastającej od ok. 10 do 250 m³/dobę, a następ-
nie w ustabilizowanej ilości ok. 230–260 m³/dobę. W cza-
sie testów na bieżąco prowadzono pomiary gęstości wydo-
bytej wody oraz zawartości chlorków, a dla uzyskanego
gazu wykonywano pomiary zawartości CH₄ metanomier-
zem. Okresowo pobierano próbki gazu i wód złożowych
do badań składu chemicznego.

Po zakończeniu testów dopływu metanu (wyłączeniu
pompy), przez tydzień prowadzono test odbudowy ciśnień,
następnie przystąpiono do demontażu urządzeń wgłębnych
i powierzchniowych na czas przestoju do zakończenia
szczelinowania.

Tabela 51**Rozkład czasowy prac związanych z wykonaniem testów produkcyjnych dopływu metanu**

Time schedule of gas flow testing operations

Test produkcyjny Production test	Rodzaj prac Type of operations	Czas (dni) Time (days)
Pierwsza seria testów (przed szczelinowaniem) First series of tests (before fracturing)	roboty przygotowawcze, prace rekonstrukcyjne w otworze oraz montaż urządzeń wgłębnych i powierzchniowych	9
	testy produkcyjne dopływu metanu	40
	test odbudowy ciśnień po pierwszej serii testów	6
	prace demontażowe	4
Druga seria testów (po szczelinowaniu) Second series of tests (after fracturing)	roboty przygotowawcze, prace rekonstrukcyjne w otworze oraz montaż urządzeń wgłębnych i powierzchniowych	9
	testy produkcyjne dopływu metanu	39
	prace demontażowe i likwidacyjne odwiertu Wesoła PIG 1	14

Przebieg drugiej serii testów (po szczelinowaniu)

Ogólne założenia projektowe tej serii testów były analogiczne jak dla serii pierwszej, przy czym, bazując na wynikach osiągniętych w czasie poprzednich testów (znając ciśnienie i głębokość lustra wody w otworze, przy których pojawił się dopływ gazu), harmonogram pompowania zmodyfikowano następująco:

- do obniżenia lustra wody w otworze do głęb. 660 m – pompowanie bez przerw,
- obniżenie lustra od 660 do 700 m – w ciągu 1 doby,
- obniżenia lustra od 700 do 740 m – w ciągu 2 dób,
- od głęb. 740 m – obniżanie lustra z prędkością 10 m/dobę,
- głęb. 920–930 m – poziom stabilizacji lustra wody.

Regulacja prędkości obniżania lustra wody była prowadzona – analogicznie jak przy pierwszej serii testów – na podstawie ciągłego odczytu pomiarów z ciśnieniomierza wgłębnego. Po wykonaniu prac rekonstrukcyjnych poziom wody w otworze ustabilizował się na głęb. 546 m (ciśnienie 574 psi, 3,96 MPa). Początek dopływu gazu zanotowano

przy poziomie lustra wody na głęb. 790 m (ciśnienie 227,5 psi, 1,57 MPa) w dwunastym dniu testów. Razem z dopływającym gazem stwierdzono blisko dwukrotnie większą niż poprzednio ilość wody złożowej (blisko 3 m³/dobę), co spowodowało, że od głęb. poziomu wody ok. 913 m (ciśnienie ok. 51 psi, 0,35 MPa) było konieczne ciągłe pompowanie z wydatkiem 100–120 l/godz. Zwiększony wydatek wody powodował konieczność regulacji pompy w celu utrzymania stabilizacji ciśnienia (poziomu lustra wody). Jednocześnie w dopływającej wodzie złożowej stwierdzono znaczne zanieczyszczenie pyłem węglowym (zjawisko niewystępujące przy pierwszej serii testów), które zwiększało się w miarę obniżania lustra wody, co powodowało zatykanie pompy, aż do jej całkowitej blokady, i konieczność wyciągania pompy do oczyszczenia. W związku z powyższym, po trzykrotnym wyciąganiu i oczyszczaniu pompy dalsze testowanie dopływu metanu zakończono.

W czasie drugiej serii testów przeprowadzono analogiczne opróbowanie i badania analityczne wód złożowych i gazu jak podczas pierwszej serii testów.

WYNIKI TESTÓW PRODUKCYJNYCH

Wyniki pierwszej serii testów (przed szczelinowaniem)

W czasie pierwszej serii testów, trwającej 40 dni, produkcja gazu z otworów zespolonych rozpoczęła się 15 dnia, po obniżeniu ciśnienia w otworze do 266 psi (1,83 MPa) oraz poziomu wody w otworze na głęb. 761,3 m MD i rosła wraz z obniżaniem ciśnienia w otworze. Przy ciśnieniach rzędu 30–40 psi (0,21–0,28 MPa) oraz poziomie wody na głęb. ok. 920 m, produkcja gazu ustabilizowała się na poziomie 230–240 m³. Wydobyto w sumie 3702 m³ gazu, z czego największa produkcja dzienna wyniosła 264 m³. Ilość odbieranej wody złożowej wynosiła maksymalnie ok. 3,3 m³/dobę, a po uzyskaniu dopływu gazu kształtowała się w granicach 1,3–2,3 m³/dobę z tendencją spadkową.

Wykres wydajności i ciśnienia gazu i wody w czasie pierwszej serii testów zilustrowano na [figurze 47](#), natomiast skumulowaną produkcję wody i gazu przedstawiono na [figurze 48](#).

Wyniki drugiej serii testów (po szczelinowaniu)

W czasie drugiej serii testów, trwającej 39 dni, produkcja gazu rozpoczęła się 11 dnia od rozpoczęcia testów, po obniżeniu ciśnienia do 227,5 psi (1,57 MPa) i poziomu wody w otworze do głęb. 790 m. Ze względu na problemy z pompą API 20-125 RHAC, nie udało się ustabilizować ciśnienia w otworze na planowanym poziomie i dokończyć testów. Wydobyto łącznie 2916 m³ gazu, a największa produkcja dzienna wyniosła 224 m³.

Wykres wydajności i ciśnienia gazu i wody w czasie testów zilustrowano na [figurze 49](#), natomiast skumulowaną produkcję wody i gazu przedstawiono na [figurze 50](#).

Skład chemiczny gazu złożowego

W czasie prowadzenia testów produkcyjnych pobrano łącznie 9 próbek gazu, w celu oznaczenia jego składu chemicznego. Próbkę pobierano w odpowiednich odstępach czasowych, aby odzwierciedlały różne fazy testów. Podczas pierwszej serii testów pobrano 4 próbki gazu – pierwszą w 21., a ostatnią w 42. dniu testów (w czasie testu odbudowy ciśnienia) ([tab. 52](#)). Podczas drugiej serii testów pobrano 5 próbek gazu – pierwszą w 15., a ostatnią w 35. dniu testów ([tab. 52](#)). W wyniku analiz chromatograficznych próbek gazu, pobranych w czasie testów dopływu metanu, określono zawartość: N₂, O₂, CO₂, H₂, He oraz węglowodorów (C1–C6+ w próbkach przed szczelinowaniem oraz C1–C4+ po szczelinowaniu). W [tabeli 53](#) podano skład gazu po wyeliminowaniu składników niewchodzących w skład gazu złożowego.

Na podstawie wyników analiz chromatograficznych pobranych próbek stwierdzono, że głównym składnikiem gazu złożowego jest metan, którego zawartość wynosi średnio 92,8%, z niewielkimi domieszkami azotu (średnio 5,4%) i dwutlenku węgla (średnio 1,4%) oraz śladowych ilości wyższych węglowodorów ([tab. 53](#)).

Nie zaobserwowano wyraźnej różnicy w składzie gazu wraz z czasem trwania pompowania oraz zmianą ciśnienia.

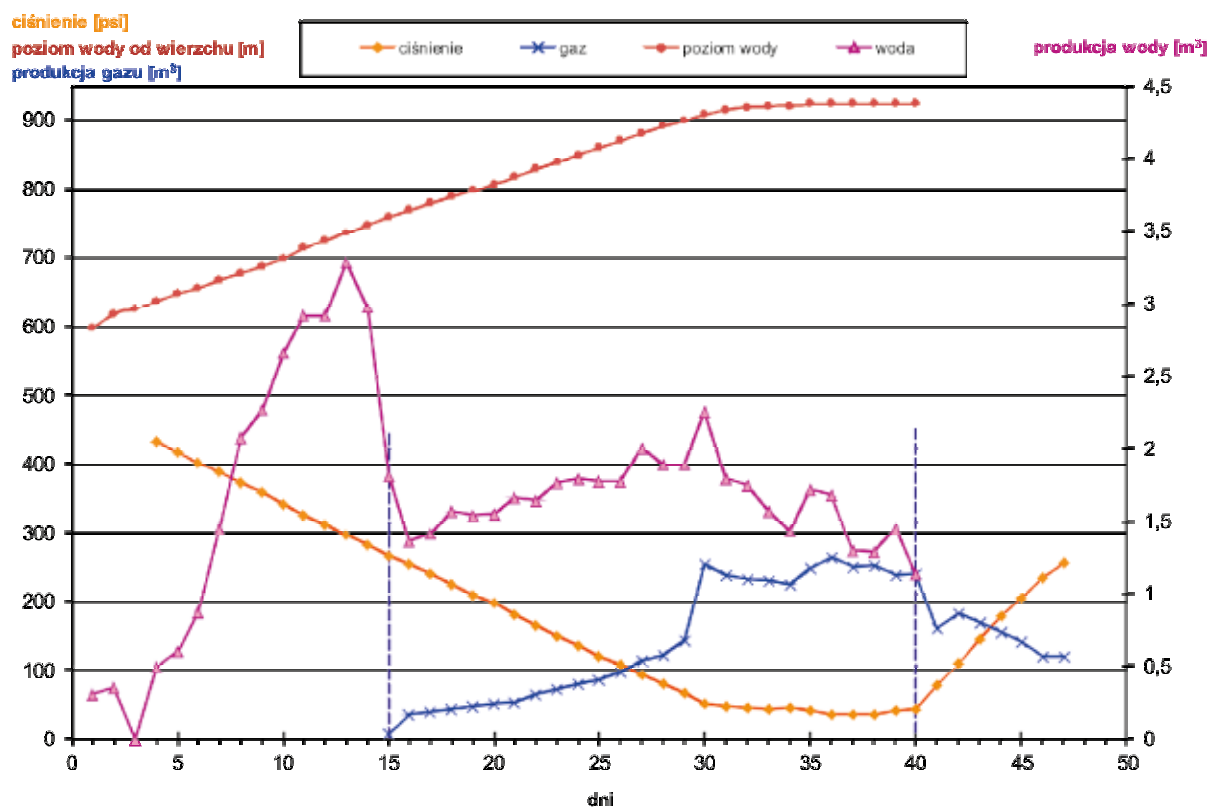


Fig. 47. Przebieg pierwszej serii testów dopływu metanu, przed szczelinowaniem

Results of the first gas flow testing series, before fracture stimulation

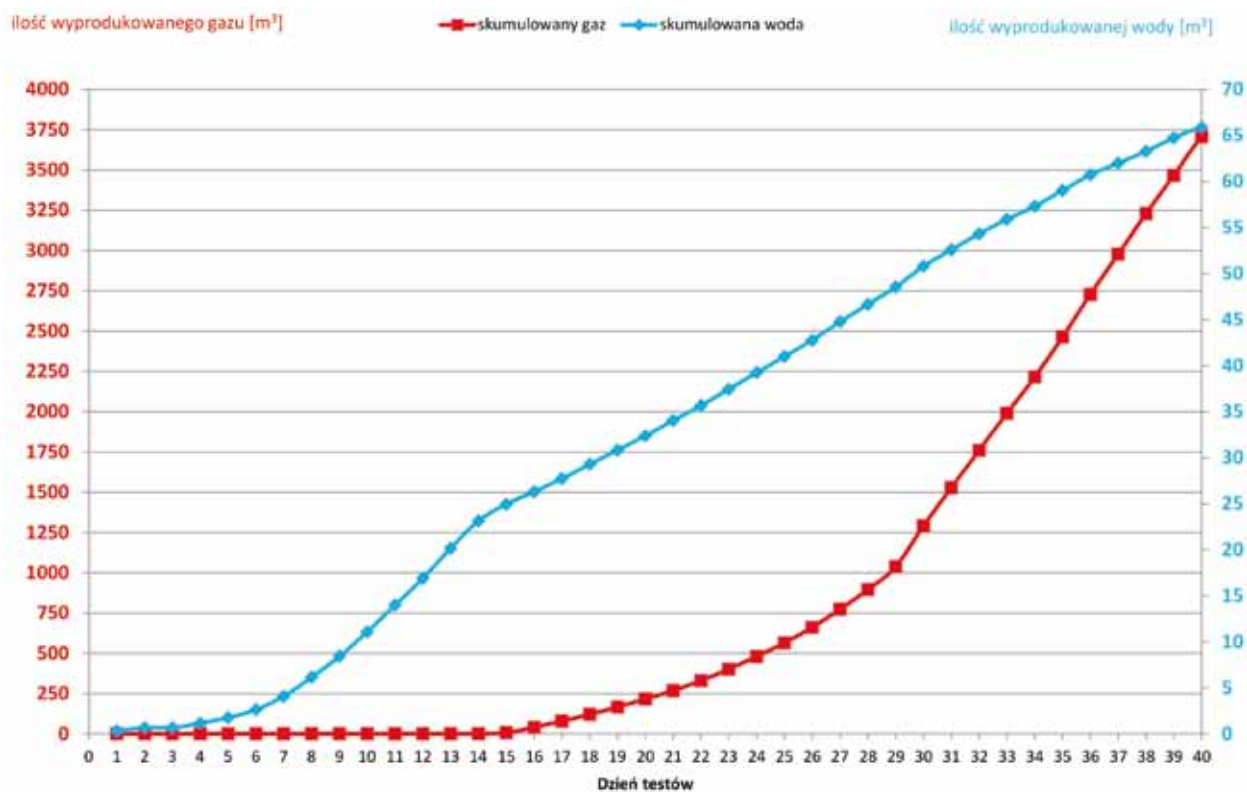


Fig. 48. Skumulowana produkcja gazu i wody w czasie pierwszej serii testów dopływu metanu, przed szczelinowaniem

Cumulative production of gas and water during the first gas flow testing series, before fracture stimulation

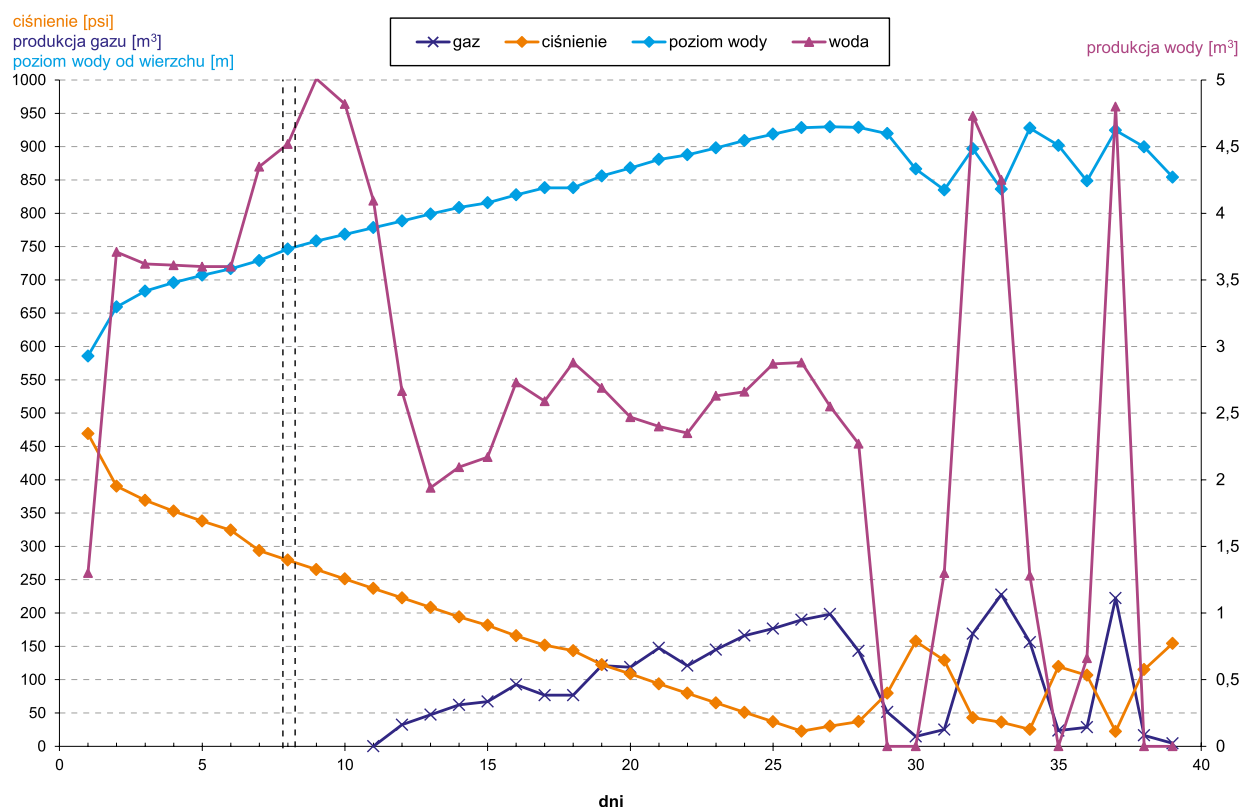


Fig. 49. Przebieg drugiej serii testów dopływu metanu, po szczelinowaniu

Results of the second gas flow testing series, after fracture stimulation

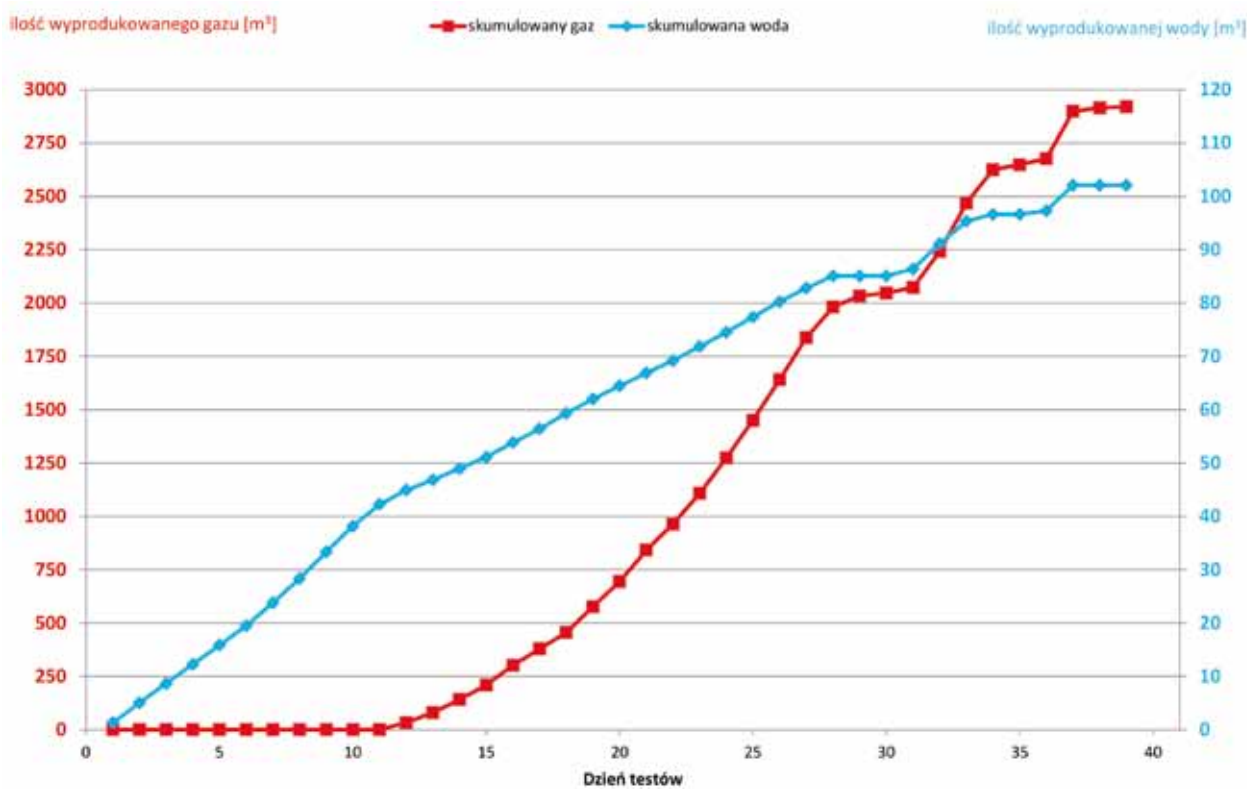


Fig. 50. Skumulowana produkcja gazu i wody w czasie drugiej serii testów dopływu metanu, po szczelinowaniu

Cumulative production of gas and water during the second gas flow testing series, after fracture stimulation

Tabela 52**Zestawienie pobranych próbek gazu
poddanych badaniom składu gazu**

List of samples collected for compositional analyses

Seria testów Testing series	Lp.	Kod próbki gazu Sample code	Czas od rozpoczęcia testu (dni) Elapsed time of testing (days)
Przed szczelinowaniem Before fracturing	1.	WES-1/01/H	21
	2.	WES-1/02/H	30
	3.	WES-1/03/H	37
	4.	WES-1/04/H	42
Po szczelinowaniu After fracturing	5.	WES-1H/F/02	15
	6.	WES-1H/F/04	21
	7.	WES-1H/F/05	25
	8.	WES-1H/F/08	29
	9.	WES-1H/F/10	35

Skład gazu nie zmieniał się także znacząco pomiędzy próbkami pobranymi przed i po zabiegu szczelinowania. W testach po tym zabiegu stwierdzono jednak zwiększenie zawartości dwutlenku węgla (średnio z 0,7 do 1,9%) względem próbek przed zabiegiem, kosztem obniżenia się zawartości azotu (średnio z 5,8 do 5,1%) i metanu (średnio z 93,1 do 92,6%) (tab. 53). Należy zauważyć, że, z wyjątkiem ostatniej próbki, zawartość dwutlenku węgla wykazuje trend systematycznie rosnący z czasem od 0,5 do 2,3%, natomiast zawartość azotu, przeciwnie, wykazuje trend malejący od 6,0 do 4,7% w obu seriach testów (tab. 53). Powyższe trendy potwierdzają preferencyjne sorbowanie dwutlenku węgla względem metanu i azotu oraz najsłabsze powinowactwo sorpcyjne azotu, który wykazuje skłonność do szybkiej desorpcji.

Tabela 53**Skład gazu [% mol/mol] po wyeliminowaniu składników nie wchodzących w skład gazu złożowego**

Gas composition [% mol/mol] after removing components which do not occur in CBM reservoir gas

Seria testów Testing series	Kod próbki gazu Sample code	N ₂	CO ₂	CO	H ₂	He	Węglowodory Hydrocarbons					
							C1	C2	C3	C4	C5	C6+
							[% mol/mol]					
Przed szczelinowaniem Before fracturing	WES-1/01/H	5,98	0,5	<0,001	0,027	0,31	93,1	0,08	0,005	0,002	0,002	0,003
	WES-1/02/H	5,78	0,73	<0,001	0,042	0,26	93,1	0,08	0,003	0,001	0,001	0,003
	WES-1/03/H	5,68	0,69	<0,001	0,009	0,25	93,3	0,08	0,003	0,001	<0,001	0,002
	WES-1/04/H	5,89	0,81	<0,001	0,012	0,25	93	0,08	0,003	0,001	0,001	0,002
Po szczelinowaniu After fracturing	WES-1H/F/02	5,6	1,4	–	–	0,2	92,6	0,1	<0,1	0,004		
	WES-1H/F/04	5,1	2,1	–	–	0,2	92,5	0,1	<0,1	0,003		
	WES-1H/F/05	5,0	2,1	–	–	0,2	92,6	0,1	<0,1	0,002		
	WES-1H/F/08	4,7	2,3	–	–	0,2	92,7	0,1	<0,1	0,003		
	WES-1H/F/10	5,2	1,8	–	–	0,2	92,7	0,1	<0,1	0,002		

PODSUMOWANIE

W zestawie otworów połączonych Wesoła PIG 1 i Wesoła PIG 2H przeprowadzono dwie serie testów produkcyjnych dopływu metanu – przed zabiegiem szczelinowania hydraulicznego i po nim – trwające odpowiednio 40 i 39 dni. Testy przeprowadzono przy użyciu wgłębnej pompy żerdziowej zapuszczonej do otworu pionowego Wesoła PIG 1.

Podczas pierwszej serii testów (przed szczelinowaniem) faza odwodnienia trwała 30 dni, a inicjacja przypływu gazu nastąpiła przy ciśnieniu dennym ok. 1,83 MPa, po czym przez 10 dni fazy eksploatacyjnej wydajność produkowanego gazu ustabilizowała się na poziomie 230–240 m³/dobę. Ilość odbieranej wody złożowej wynosiła maksymalnie ok. 3,3 m³/dobę, a po uzyskaniu dopływu gazu kształtowała się w granicach 1,3–2,3 m³/dobę z tendencją spadkową.

Uzyskane w czasie testów niskie wydajności dopływu gazu i wody świadczą o bardzo niskiej przepuszczalności pokładu węgla 510, udostępnionego otworem horyzontalnym nieorurowanym. Wyniki te są zbliżone do wydajności uzyskiwanej w testach produkcyjnych, prowadzonych

przez Dart Energy w zestawie Gilowice-1 i Gilowice-2H o podobnej konfiguracji i głębokości zalegania pokładu węgla, gdzie uzyskano stabilne wydajności gazu rzędu 100–170 m³/dobę gazu i wody w granicach 1,0–2,0 m³/dobę. Wydajność gazu okazała się zatem niższa w otworach Gilowice, mimo prawie dwukrotnie wyższej całkowitej zawartości gazu zmierzonej na próbkach rdzeni wiertniczych. Świadczy to dobitnie o tym, że przepuszczalność jest niezmienne bardzo niska w różnych rejonach GZW i ma ona decydujący wpływ na kształtowanie się wydajności gazu. Stąd wynika konieczność intensyfikacji dopływu gazu, która została wykonana w otworze horyzontalnym Wesoła PIG 2H. Z uwagi na awarię wiertniczą, zrealizowano jednak zaledwie dwa z ośmiu zaplanowanych zabiegów szczelinowania, co znacząco zmniejszyło ich możliwy zasięg i efektywność.

Podczas drugiej serii testów (po szczelinowaniu) faza odwodnienia trwała 26 dni, a inicjacja przypływu gazu nastąpiła przy ciśnieniu ok. 1,57 MPa, tj. o 14% niższym niż w pierwszej serii testów. Świadczy to o efektywnym obni-

zeniu zawartości gazu w pokładzie węgla w czasie pierwszej serii testów. Faza eksploatacyjna drugiej serii testów okazała się jednak silnie zaburzona w wyniku problemów z pompą żerdziową, która nie poradziła sobie z dużą ilością drobin węgla powstałych podczas szczelinowania hydraulicznego. Z tych powodów nie uzyskano stabilnych warunków dopływu, a krótkotrwała produkcja gazu, osiągająca maksymalne wydajności gazu rzędu 220 m³/dobę, nie jest miarodajna.

Pewne wnioski o efektywności zabiegu szczelinowania można jednak wyciągnąć ze zwiększonych, w porównaniu z pierwszą serią testów, wydajności wody złożowej. Uzyskana w drugiej serii wydajność wody, maksymalna (na poziomie 5 m³/dobę) i ustabilizowana (w granicach 2,0–3,0 m³/dobę), jest ok. 40–50% wyższa od wydajności osiągananej w czasie pierwszej serii testów, co wskazuje na zwiększenie przepuszczalności. Uzyskany efekt jest jednak stosunkowo mało znaczący, jeśli weźmie się pod uwagę efektywność masywnego szczelinowania w zarurowanym otworze horyzontalnym Gilowice-2H, gdzie produktywność wody złożowej zwiększyła się ok. 10-krotnie (prace wykonane w latach 2016–2017 przez PGNiG oraz PIG-PIB).

Analiza przebiegu i wyników testów produkcyjnych pozwala wyciągnąć wnioski sugerujące obniżenie pierwotnej gazoności testowanego pokładu węgla w wyniku długotrwałego oddziaływania powiększającego się leja depresji, związanego z eksploatacją górniczą KWK „Mysłowice–Wesoła”. Świadczy o tym kilka istotnych przesłanek. Początkowe ciśnienie złożowe, wynoszące zaledwie 3,5 MPa, było anomalnie obniżone w stosunku do hydrostatycznego, co wskazuje na objęcie pokładu oddziaływaniem leja depresji. Uwalnianie metanu z pokładu rozpoczę-

ło się przy ciśnieniu wgłębnym ok. 1,8 MPa bar, które okazało się ok. 0,7 MPa niższe niż krytyczne ciśnienie desorpcji obliczone w badaniach gazowych rdzenia w otworze pionowym. Może to być świadectwem pogarszania się warunków gazowych w odcinku horyzontalnym otworu kierunkowego z odległością od otworu pionowego, w miarę zbliżania się do strefy naruszonej eksploatacją górniczą węgla.

Znamienne jest także porównanie krytycznego ciśnienia desorpcji, określonego na podstawie testów produkcyjnych w otworze Wesoła PIG 1, do wyników testów produkcyjnych w otworach Texaco (WP-TXA – five spot). Krytyczne ciśnienie desorpcji w otworach WP-TXA (ok. 4,5–5,0 MPa) było ponad dwukrotnie wyższe, przy zbliżonej zawartości gazu całkowitego w rdzeniu (ok. 8 m³/t). Podobną wysokość krytycznego ciśnienia desorpcji, na poziomie powyżej 4 MPa, obserwowano także w testach produkcyjnych pokładu 510 prowadzonych metodą kawitacji w otworze Amoco-Wygorzele 1, oddalonym o kilka kilometrów od otworów Wesoła. Sugeruje to wyższą pierwotną gazoność pokładu 510, w warunkach nienaruszonych przed rozpoczęciem działalności górniczej w rejonie kopalni „Mysłowice–Wesoła”.

O wpływie leja depresji na warunki gazowe pokładu 510 w rejonie otworów Wesoła świadczy także skład chemiczny gazu złożowego, w którym stwierdzono ok. 5% zawartość azotu, podczas gdy skład gazu z desorpcji rdzenia w otworze Wesoła PIG 1 wskazywał na ok. 2%. Podobnie niskie (do 2%) zawartości azotu obserwowano powszechnie w testach produkcyjnych otworów Amoco i Texaco. Podwyższone zawartości azotu w gazie wskazują na możliwość przedostawania się azotu ze strefy objętej wpływem eksploatacji górniczej.

Jerzy HADRO, Janusz JURECZKA

SZCZELINOWANIE HYDRAULICZNE

Celem zabiegu szczelinowania było zwiększenie dopływu metanu z pokładów węgla 501–510 w odcinku horyzontalnym odwiertu Wesoła PIG 2H, poprzez uzyskanie sieci spękań w węglu kamiennym, z jednoczesnym podsadzeniem piaskiem powstałych szczelin. Szczelinowanie hydrauliczne w pokładzie 510 przeprowadzono w październi-

ku 2014 r. w horyzontalnym odcinku sekcji niezarurowanej otworu Wesoła PIG 2H, za przecięciem intersekcyjnym z otworem Wesoła PIG 1. Wykonano dwa zabiegi z ośmiu zaplanowanych w projekcie technicznym. Powodem była awaria wiertnicza (przechwycenie przewodu wiertniczego), której usunięcie wymagało długotrwałej instrumentacji.

TECHNOLOGIA I ZAKRES ZABIEGU

Zabieg szczelinowania przeprowadzono w technologii SurgiFrac firmy Halliburton, która jest unikalną technologią w przypadku wieloetapowego szczelinowania hydraulicznego w otworach niezarurowanych. SurgiFrac jest procesem hydroszczelinowania, który pozwala na precyzyjne rozmieszczenie szczelin w otworze bez konieczności izolacji interwa-

łów. Jest prawdopodobnie jedyną znaną technologią, która rozwiązuje problem z umiejscowieniem szczelin w otworach nieorurowanych przy użyciu dynamicznego ukierunkowania przepływu płynu. Zamiast używania korków mechanicznych lub materiałów chemicznych w celu izolacji interwałów, system używa ruchu dwóch cieczy w celu ukierunkowania

przepływu płynu w jeden, wybrany punkt formacji. Proces ten bazuje na mechanice skał oraz na efekcie Bernoulliego.

W procesie tym płyn jest wytłaczany z dysz głowicy szczelinującej (*Hydro Jetting Tool*) w kierunku przestrzeni pierścieniowej, w celu wykonania tuneli hydroperforacyjnych w skale otaczającej odwiert. Ciśnienie w głowicy jest wyższe niż ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej. Energia pochodząca z ciśnienia we wnętrzu przewodu tłoczącego (przewód wiertniczy) jest przetworzona na energię kinetyczną, dzięki czemu prędkość wypływu płynu z dysz głowicy jest znacząca. Prędkość płynu we wnętrzu przewodu jest niska, niższa niż 50 ft/sec (15 m/sec), jednak ciśnienie w dyszach jest w zakresie 2000–4000 psi (138–276 bar), czyli znacząco wyższe niż w przestrzeni pierścieniowej. Skutkuje to zwiększeniem prędkości wypływu płynu z dysz do 400 ft/sec (122 m/sec). Utworzona energia kinetyczna oraz efekt Bernoulliego dynamicznie kierują strugą cieczy wraz z podsadzką w żądane miejsce.

Zabieg szczelinowania hydraulicznego w pokładzie węgla 510 wykonano z wykorzystaniem aparatury specjalistycznej oraz serwisu SurgiFrac. Całość zabiegu przeprowadzono poprzez rury płuczkowe $\varnothing 2\frac{7}{8}$ " i przestrzeń pierścieniową $\varnothing 2\frac{7}{8}" \times 7"$ równocześnie, w ten sposób, że płyn usieciowany z podsadzką pompowano przez przewód, a płyn na bazie żelu liniowego bez podsadzki przez przestrzeń pierścieniową.

W niezarurowanym odcinku horyzontalnym w pokładzie węgla 510 zaplanowano wykonanie do 8 zabiegów szczelinowania w odstępie po ok. 82–83 m. Każdy zabieg zaprojektowano tak, aby połowiczna długość modelowej szczeliny w rozkładzie horyzontalnym nie przekraczała 70 m, a wysokość szczeliny (w rozkładzie pionowym) nie przekraczała 15 m (fig. 51), przy czym kierunek modelowej szczeliny nie jest prowadzony prostopadle do wyrobisk i osi otworu lecz pod optymalnym kątem w stosunku do naturalnych spękań w pokładzie węgla.

REALIZACJA ZABIEGÓW SZCZELINOWANIA HYDRAULICZNEGO

Całość prac związanych z realizacją szczelinowania hydraulicznego, w przypadku wybranej technologii zabiegów w otworze horyzontalnym Wesola PIG 2H, składała się z dwóch zasadniczych etapów:

- prace przygotowawcze,
- przeprowadzenie zabiegu w otworze.

Prace przygotowawcze

Przed przystąpieniem do szczelinowania przeprowadzono prace rekonstrukcyjne, polegające na przerobieniu i wypłukaniu odwiertu. Pełny program prac rekonstrukcyjnych obejmował:

- mobilizację i montaż urządzenia do rekonstrukcji Cardwell KM 200,
- odbiór techniczny (kolaudację) zmontowanego urządzenia na odwiercie,
- zatłoczenie odwiertu wodą,
- montaż oraz próbę sprawności i szczelności uzbrojenia przeciwerupcyjnego,
- marsz kontrolny frezerem stożkowym o średnicy $\varnothing 5\frac{7}{8}"$ na rurach płuczkowych $\varnothing 2\frac{7}{8}"$ do głębokości końcowej, tj. 1918 m (MD),
- przerobienie napotkanych interwałów przewężeń otworu lub zasypów,
- wypłukanie otworu,
- wyciągnięcie zestawu przewodu do wierzchu.

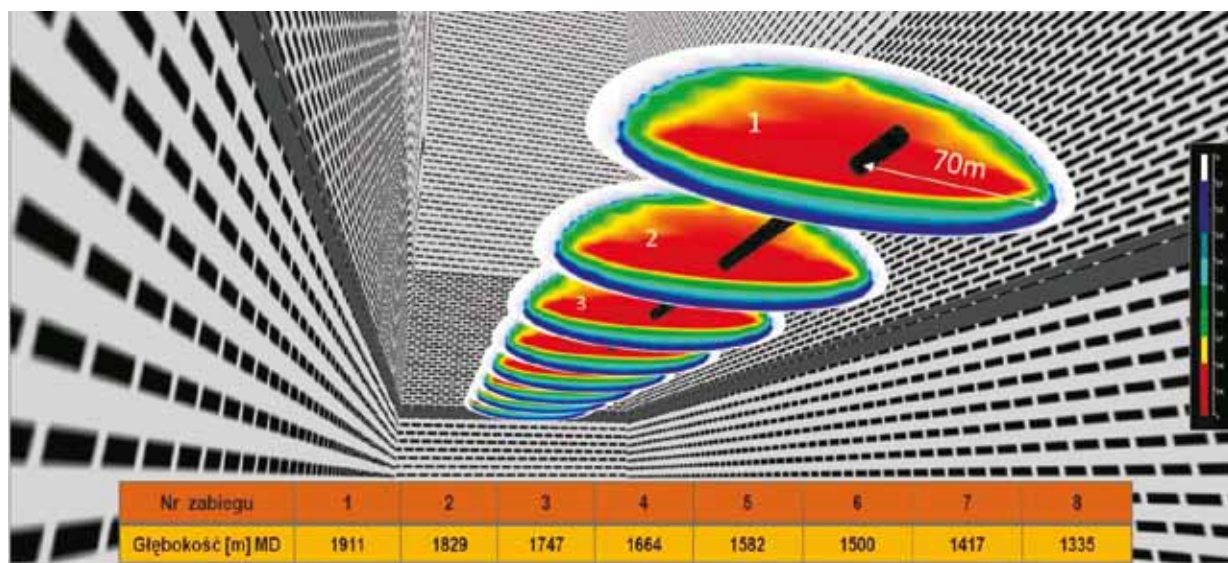


Fig. 51. Zakładany rozkład szczelin i interwałów do szczelinowania w otworze Wesola PIG 2H (wg firmy Halliburton)

Designed intervals and distribution of fractures stimulated in the Wesola PIG 2H borehole (according to Halliburton)

Przed przystąpieniem do zabiegów szczelinowania dokonano wcześniejszej mobilizacji i montażu sprzętu oraz dostarczenia materiałów do zabiegów, w tym propanu (materiału podsadzkowego) oraz wody. Podstawowy sprzęt do wykonania zabiegu szczelinowania stanowiły:

- urządzenie do rekonstrukcji Cardwell KM 200,
- pompy HQ-2000 do pompowania przez rury płuczkowe – 2 szt.,
- pompa Twin HQ do pompowania w przestrzeni pierścieniowej,
- mieszacz wstępny,
- mieszacz główny,
- zbiorniki na wodę o pojemności 80 m³ – 9 szt. (w tym dwa zbiorniki robocze na żel liniowy),
- silosy na podsadzkę – 2 szt.,
- Centrum Kontroli Technicznej z RTO i Laboratorium Terenowym,
- urządzenie Surgi Jetting Tool (SurgiFrac) – głowica szczelinująca,
- jednostka Slickline z korkami oraz łącznikami posadowymi.

Zabiegi szczelinowania hydraulicznego przeprowadzono w październiku 2014 r. Wykonano dwa zabiegi na głęb. 1891,5–1892,5 m MD i 1833,0–1834,0 m MD. Przed zabiegiem w otworze wykonano tunele hydro-perforacyjne oraz test chłonności, którego celem było sprawdzenie efektywności cięcia/hydroperforacji oraz określenie spodziewanego zakresu ciśnień podczas pracy, a także szybkości spadku ciśnienia po przeprowadzonym zabiegu szczelinowania. W celu wykonania tuneli hydroperforacyjnych tłoczony był żel liniowy wraz z piaskiem 100 mesh z koncentracją 120 kg/m³ z wydatkiem 1,27 m³/min. Cięcie/hydroperforacja trwała ok. 10 minut. Główny zabieg wykonano przy użyciu żelu usieciowanego wraz z podsadzką, który tłoczono poprzez rury płuczkowe Ø 2 7/8" ze średnim wydatkiem tłoczenia 1,33 m³/min przy pierwszym zabiegu (na

głęb. 1891,5–1892,5 m MD) oraz 1,47 m³/min przy drugim zabiegu (na głęb. 1833,0–1834,0 m MD). W tym samym czasie żel liniowy pompowano do przestrzeni pierścieniowej Ø 7" × 2 7/8" z wydatkiem tłoczenia 0,95 m³/min przy pierwszym zabiegu oraz 1,04 m³/min przy drugim zabiegu.

Czas pompowania pierwszego zabiegu na głębokości 1891,5–1892,5 m MD wyniósł 83 min. Użyto 72,37 m³ czystego żelu liniowego oraz 15,10 m³ żelu liniowego niosącego 1,49 t podsadzki kwarcowej 100 mesh do wykonania tuneli hydroperforacyjnych oraz 18,75 m³ czystego żelu usieciowanego i 20,08 m³ żelu usieciowanego niosącego 13,31 t podsadzki kwarcowej 20/40 na potrzeby głównego zabiegu. Czas pompowania drugiego zabiegu na głęb. 1833,0–1834,0 m MD wyniósł 52 min. Użyto 47,99 m³ czystego żelu liniowego, 14,91 m³ żelu liniowego niosącego 1,608 t piasku kwarcowego 100 mesh do wykonania tuneli hydroperforacyjnych oraz 17,05 m³ czystego żelu usieciowanego i 19,71 m³ żelu usieciowanego niosącego 12,96 t podsadzki kwarcowej 20/40 na potrzeby głównego zabiegu.

Do wykonania zabiegów szczelinowania hydraulicznego użyto płynu szczelinującego na bazie guaru. Bazowym płynem był żel liniowy. Płyn ten był używany w czasie cięcia, do pompowania w przestrzeń pierścieniową oraz w czasie przybitki. Żel sieciowany był przygotowany poprzez dodanie składnika sieciującego oraz łamacza struktury do żelu liniowego. Płyn sieciowany był pompowany poprzez rury Ø 2 7/8", natomiast żel liniowy był pompowany w przestrzeń pierścieniową Ø 7" × 2 7/8".

W czasie wykonywania zabiegów szczelinowania na głowicy odwiertu pionowego Wesola PIG 1 zamontowano transponder ciśnienia, przekazujący dane do Centrum Dowodzenia TCC na wiertni Wesola PIG 2H.

Podsumowanie wartości najważniejszych parametrów charakteryzujących szczelinowanie hydrauliczne ujęto w [tabeli 54](#), natomiast jego przebieg poszczególnych zabiegów zilustrowano przy pomocy wykresów ([fig. 52, 53](#)).

Tabela 54

Podsumowanie szczelinowania hydraulicznego w otworze Wesola PIG 2H

Summary of hydraulic fracture stimulation in the Wesola PIG 2H borehole

Parametry zabiegu Operating parameters	Jednostka Unit	Zabieg 1 (1891,5–1892,5 m MD) Frac 1 (1891,5–1892,5 m MD)		Zabieg 2 (1833,0–1834,0 m MD) Frac 2 (1833,0–1834,0 m MD)	
		Przewód roboczy Tubing	Przestrzeń pierścieniowa Annulus	Przewód roboczy Tubing	Przestrzeń pierścieniowa Annulus
Czas pompowania Pumping time	min	91	33	54	28
Maksymalne ciśnienie pompowania Maximum pumping pressure	bar	452,4	89,7	369,3	131
Maksymalny wydatek roboczy Maximum pumping rate	m ³ /min	1,55	1,20	1,54	1,19
Maksymalna koncentracja podsadzki Maximum proppant concentration	kg/m ³	786		992	
Średnie ciśnienie pompowania Average pumping pressure	bar	281,0	38,25	332,7	78,94
Średni czysty wydatek roboczy Average pumping rate	m ³ /min	1,14	0,95	1,31	1,04
Średni wydatek roboczy Average pumping rate	m ³ /min	1,33	0,95	1,47	1,04

Tabela 54 cd.

Parametry zabiegu Operating parameters	Jednostka Unit	Zabieg 1 (1891,5–1892,5 m MD) Frac 1 (1891,5–1892,5 m MD)		Zabieg 2 (1833,0–1834,0 m MD) Frac 2 (1833,0–1834,0 m MD)	
		Przewód roboczy Tubing	Przestrzeń pierścieniowa Annulus	Przewód roboczy Tubing	Przestrzeń pierścieniowa Annulus
Średnia koncentracja podsadzki Average proppant concentration	kg/m ³	359		419	
Czysty płyn Clean liquid	m ³	95,00	31,31	70,39	29,31
Płyn zabiegowy z podsadzką Frac fluid (with proppant)	m ³	100,20	31,31	75,97	29,31
Masa podsadzki Proppant mass	tony tons	14,80		14,30	
Maksymalne wgłębne ciśnienie pompowania Maximum downhole pumping pressure	bar	357,8		286,9	
Średnie wgłębne ciśnienie pompowania Average downhole pumping pressure	bar	216,5		240,1	
Maksymalny wgłębny wydatek roboczy Maximum downhole pumping rate	m ³ /min	2,65		2,66	
Średni wgłębny wydatek roboczy Average downhole pumping rate	m ³ /min	1,69		1,84	
Maksymalna wgłębna koncentracja podsadzki Maximum downhole pumping concentration	kg/m ³	423		449	
Objętości płynów i podsadzki: Volume of liquid and proppant	–	Łącznie: Total:		Łącznie: Total:	
Żel liniowy 20# Linear gel	m ³	87,47		63,53	
Żel usieciowiony Crosslink gel	m ³	38,83		36,17	
Piasek kwarcowy 100 MESH Quartz sand	tony tons	1,49		1,61	
Podsadzka kwarcowa 20/40 Quartz sand	tony tons	13,31		12,69	

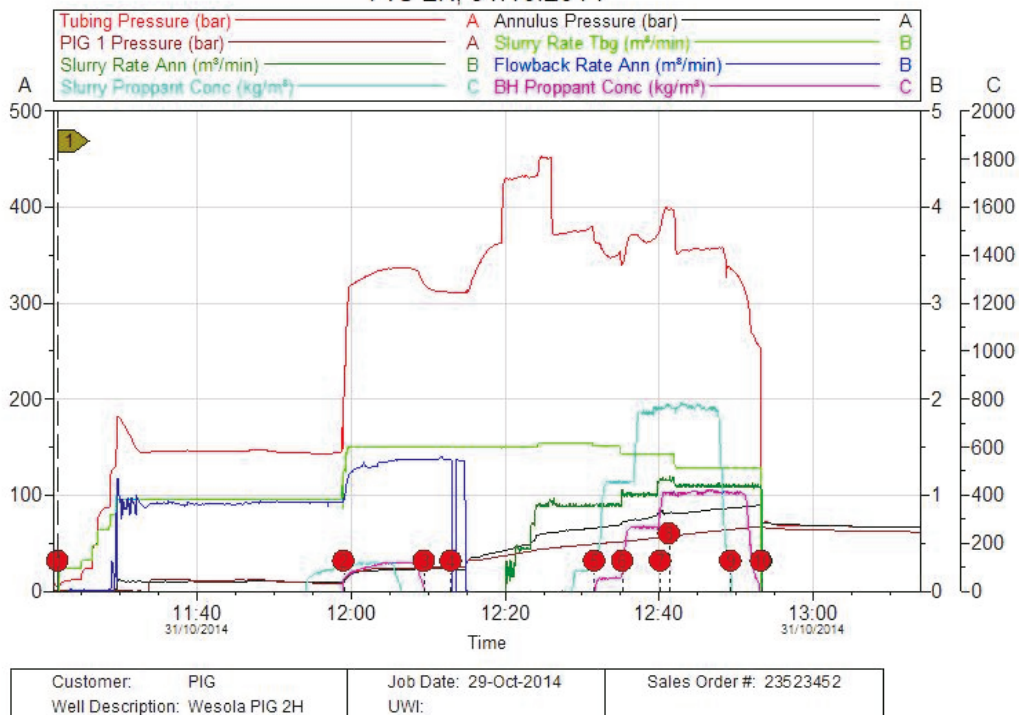
Interval 1, Main Frac Treatment
PIG 2H, 31.10.2014

Fig. 52. Wykres przebiegu parametrów szczelinowania podczas zabiegu 1 (1891,5–1892,5 m MD)

Treatment plot for fracture stimulation during phase 1 (1891,5–1892,5 m MD)

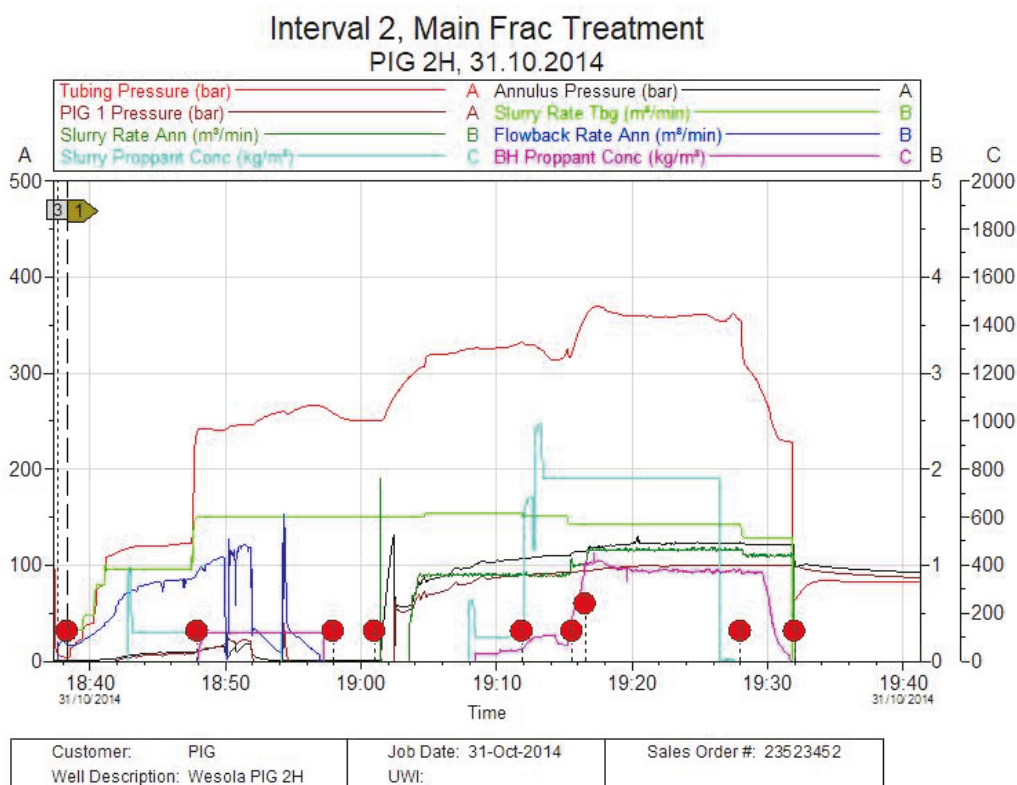


Fig. 53. Wykres przebiegu parametrów szczelinowania podczas zabiegu 2 (1833,0–1834,0 m MD)

Treatment plot for fracture stimulation during phase 2 (1833,0–1834,0 m MD)

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone w otworze Wesola PIG 2H dwa zabiegi szczelinowania hydraulicznego wykonano w odcinku horyzontalnym niezarurowanym, na głęb. 1891,5–1892,5 m MD i 1833,0–1834,0 m MD, przy pomocy technologii SurgiFrac firmy Halliburton. Szczelinowanie przeprowadzono przy użyciu płynu dwóch rodzajów płynów zabiegowych: żelu liniowego (o łącznej objętości 151 m³) oraz żelu usieciowionego (o łącznej objętości 75 m³). Jako podsadzkę wykorzystano piasek kwarcowy 100 mesh

(o łącznej masie 3,1 t) do wykonania tuneli hydroperforacyjnych oraz piasek kwarcowy (o łącznej masie 26 t) w głównej fazie szczelinowania. Dla pierwszego zabiegu średnie ciśnienie pompowania wynosiło 281 bar, przy średnim wydatku roboczym 1,33 m³/min i średniej koncentracji podsadzki 359 kg/m³. Dla drugiego zabiegu średnie ciśnienie pompowania wynosiło 333 bar, przy średnim wydatku roboczym 1,47 m³/min i średniej koncentracji podsadzki 419 kg/m³.

Robert FORMOWICZ

BADANIA ŚRODOWISKOWE

Ocenę stanu środowiska przed rozpoczęciem robót geologicznych oraz po ich zakończeniu przeprowadzono na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska z dn. 9 września 2002 roku w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. Grunty w rejonie placów wiertni otworów Wesola PIG 1 i Wesola PIG 2H zaliczono do grupy B, obejmującej: użytki rolne z wyłączeniem gruntów pod stawami i rowami, grunty leśne oraz zadrze-

wione i zakrzewione, nieużytki, a także grunty zabudowane i zurbanizowane z wyłączeniem terenów przemysłowych, użytków kopalnych oraz terenów komunikacyjnych.

W celu oznaczenia stanu początkowego środowiska w rejonie projektowanych otworów, w czerwcu 2013 r. odwiercono 10 sond badawczych, z których do badań laboratoryjnych pobrano po 5 próbek gruntów, na każdym z analizo-

wanych obszarów. Uśrednione próbki gruntów pobrano z przedziału głębokości 0,3–1,0 m.

Analizę składu chemicznego wykonano w Centralnym Laboratorium Chemicznym PIG-PIB, posiadającym certyfikat akredytacji AB 283 w dziedzinie badań chemicznych i właściwości fizykochemicznych wód, ścieków, gleb, gruntów, osadów, próbek środowiskowych i geologicznych oraz materiałów roślinnych. Zakres analiz obejmował określenie zawartości 9 głównych metali oraz zawartości olejów mineralnych, zgodnie z wykazem załączonym do ww. Rozporządzenia (tab. 55). W rejonie projektowanego otworu Wesoła PIG 1 odnotowano przekroczenia wartości dopuszczalnych dla gruntów grupy B jedynie w przypadku baru, co może być związane z procesem spalania węgla i paliw płynnych oraz naturalnie podwyższonej zawartości tego pierwiastka w skałach ilastych.

W trakcie prac przygotowawczych i zabudowy terenów wiertni, przed rozpoczęciem robót wiertniczych wykonano zabezpieczenie gruntu w miejscach szczególnie narażonych na wycieki substancji ropopochodnych, tj. pod urządzeniem wiertniczym, zbiornikiem paliwa i magazynem smarów, poprzez wyłożenie specjalnej folii ochronnej. Prace prowadzono zgodnie z wszelkimi regulacjami prawnymi oraz dobrą praktyką, aby zapobiec de-

wastacji powierzchni terenu, gleby, ujęć wody, istniejącej szaty roślinnej, upraw, zabudowań i innych elementów infrastruktury.

Po zakończeniu robót geologicznych i wykonaniu rekultywacji terenów wiertni poprzez nasadzenia leśne, przeprowadzono badania gruntów w obszarach szczególnie narażonych na zanieczyszczenia związane z prowadzonymi pracami w otworach Wesoła PIG 1 i Wesoła PIG 2H. W tym celu w czerwcu 2015 r. wykonano 3 sondy badawcze, z których pobrano uśrednione próbki gruntów z przedziału głębokości 0,3–1,0 m. Analizy wykonywano w Ośrodku Badań i Kontroli Środowiska w Katowicach, posiadającym certyfikat akredytacji AB 213N w dziedzinie badań chemicznych i właściwości fizykochemicznych wód, ścieków, gleb, gruntów i osadów. Zakres analiz laboratoryjnych dla próbek gruntów był taki sam jak podczas badań dla ustalenia stanu początkowego.

W analizowanych próbkach nie odnotowano przekroczeń wartości dopuszczalnych dla gruntów grupy B (tab. 56). W związku z tym, należy uznać, że prace geologiczne, prowadzone w latach 2013–2015, na gruntach w bezpośrednim sąsiedztwie odwiertów Wesoła PIG 1 i Wesoła PIG 2H, nie spowodowały pogorszenia ich stanu geochemicznego.

Tabela 55

Wyniki analiz chemicznych zawartości metali i olejów mineralnych w gruntach (przed rozpoczęciem inwestycji)

Results of chemical analyses of the contents of metals and mineral oils in the soils (before investment)

Numer próbki Sample number	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	Suma olejów mineralnych Total mineral oils [mg/kg]
PIG-1/1	11	274	11	58	10	9	19	48	<3	<10,0
PIG-1/2	10	336	8	59	17	15	25	81	<3	11,6 ±3,0
PIG-1/3	13	248	13	66	12	14	20	47	3	<10,0
PIG-1/4	10	280	6	45	10	10	29	38	4	22,5 ±5,9
PIG-1/5	10	316	6	54	15	10	26	60	<3	17,0 ±4,4
PIG-2H/1	5	108	5	<5	13	<3	10	25	<3	<10,0
PIG-2H/2	9	249	4	48	18	8	22	45	<3	37,0 ±9,6
PIG-2H/3	6	99	6	7	8	3	30	27	<3	23,4 ±6,1
PIG-2H/4	5	102	3	22	<5	<3	8	15	<3	11,6 ±3,0
PIG-2H/5	5	198	3	31	10	6	16	31	<3	57,1 ±14,8
WD (B)*	20	250	30	150	100	50	100	350	5	200

WD (B) – wartość dopuszczalna stężeń w glebie dla gruntów grupy B

WD (B) – concentrations limit value for soils of B group

Tabela 56

Wyniki analiz chemicznych zawartości metali i olejów mineralnych w gruntach (po zakończeniu inwestycji)

Results of chemical analyses of the contents of metals and mineral oils in the soils (after investment)

Numer próbki Sample number	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	Suma olejów mineralnych Total mineral oils [mg/kg]
PIG-1/1	2,50	37,0	4,05	18,70	4,05	3,56	22,0	34,8	0,72	13,2 ±4,0
PIG-2H/1	2,81	31,2	1,51	6,78	0,918	2,6	11,6	40,8	0,369	11,6 ±2,9
PIG-2H/2	1,86	19,8	1,39	3,62	<0,4	0,767	3,14	6,16	0,288	14,3 ±4,3
WD (B)*	20	250	30	150	100	50	100	350	5	200

WD (B) – wartość dopuszczalna stężeń w glebie dla gruntów grupy B

WD (B) – concentrations limit value for soils of B group