

Antoni Frodyma
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Intensywne udostępnianie złóż węglowodorów techniką perforacyjną

Część II. Perforacja przy ekstremalnym nadciśnieniu

Wprowadzenie

Celem perforacji jest osiągnięcie maksymalnej produktywności otworu w opłacalny sposób i ustanowienie dobrego połączenia pomiędzy otworem wiertniczym, a formacją złożową.

Podczas perforacji prowadzonej przy podciśnieniu, gwałtowny wsteczny przepływ płynu oczyszcza kanał perforacyjny przez usuwanie osłabionej skały i szczątków wkładki kumulacyjnej. Ten krótkotrwały, gwałtowny przepływ kontroluje oczyszczanie kanału perforacyjnego

i jego średnicę [1]. Jednak perforacja przy podciśnieniu nie zawsze pozwala na osiągnięcie spodziewanej produktywności odwiertu. Powodem tego może być rejon ograniczonej przepuszczalności wokół kanału perforacyjnego lub brak możliwości wytworzenia w odwiercie podciśnienia o odpowiedniej wartości. Dla takich przypadków zaproponowano technologię perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu, jako swojego rodzaju odwrócenie stosowanej typowo perforacji przy podciśnieniu w otworze.

Perforacja przy ekstremalnym nadciśnieniu

Jeden z najbardziej zauważalnych kroków rozwojowych w technologii perforacji nastąpił wraz z opracowaniem perforacji w warunkach ekstremalnego nadciśnienia (ang. EOBP – *Extreme Overbalanced Perforation*). Zabiegi w technologii EOBP oraz stymulacja zostały wykonane w kilkuset otworach, co pozwoliło na dokładną ocenę tej techniki. Metoda ta poprawia sprawność udostępnienia otworu, zapewnia mniejszy stopień uszkodzenia formacji skalnej oraz umożliwia jednoczesne wykonanie procedur perforacji i stymulacji w szerokim zakresie technologicznych warunków wglębnych.

Proces ten wiąże się z perforacją formacji złożowej z użyciem dowolnego, dostępnego wspólnie perforatora, przy czym preferuje się stosowanie perforatorów korpusowych. W korpusie takiego perforatora pozostaje większość szczątków ładunków perforacyjnych. Zastosowanie największego ciśnienia dennego będzie możliwe

w przypadku zapuszczania perforatorów na przewodzie rurowym. Przed wykonaniem perforacji, w otworze wytwarza się ciśnienie o wielkości zbliżonej do ciśnienia dennego, równe co najmniej ciśnieniu szczelinowania formacji. Typowo stosowany gradient ciśnienia wynosi od 0,025÷0,029 MPa/m. Idealnie gradient ciśnienia powinien przekraczać wszystkie główne naprężenia występujące w miejscu zabiegu. Regułą praktyczną na wartość minimalnego ciśnienia jest gradient szczelinowania formacji +0,0091 MPa/m.

Ciśnienie zadaje się za pośrednictwem samej cieczy lub samego gazu, albo ich kombinacji. Preferowana metoda wiąże się z zastosowaniem kolumny cieczy znajdującej się w interwale perforacji i wyżej – do określonego z góry poziomu od powierzchni. Ponad zwierciadłem cieczy stosowana jest kolumna gazu, zapewniająca dodatkowe ciśnienie wymagane do uzyskaniażądanego gradientu.

W momencie wykonania perforacji rozprężanie gazu przełoży się bezpośrednio na moc wywieraną na formację. W ten sposób, w warunkach wglębnych można uzyskać natężenia przepływu zatłaczania praktycznie nieosiągalne z powierzchni.

Wysokie natężenie przepływu przemieszczającego się płynu będzie przekraczać zdolność jego przyjmowania przez utworzone kanały perforacyjne. To zdarzenie będzie trwać od jednej do kilkunastu sekund, do momentu przekroczenia przez ciśnienie wartości najmniejszego głównego ciśnienia szczelinowania.

Skład płynu zatłaczanego do horyzontu złożowego można dobrać tak, by poprawić względną przepuszczalność fazową dla płynu produkowanego z horyzontu (tj. ropy lub gazu). W niskociśnieniowych otworach gazowych do zainicjowania szczelinowania potrzebne są tylko niewielkie ilości cieczy ($0,16 \div 0,8 \text{ m}^3$), które mogą być łatwo rozproszone przez zatłaczanie gazu – takiego jak azot, lub ciekłego dwutlenku węgla. W otworach ropnych można stosować mieszanki środków powierzchniowo-czynnych, które pozostawiają formację w stanie zwilżalnym wodą.

Wyjątkowo duże czynniki oddziaływania perforacyjnych ładunków kierunkowych (prędkości $7000 \div 9200 \text{ m/s}$, temperatury $2760 \div 5570^\circ\text{C}$ i ciśnienia $27,5 \div 34,5 \text{ GPa}$), wraz z szybkim rozprężaniem azotu sprężonego do wysokiego ciśnienia, tworzą wysokie prędkości erodowania ($8 \div 48 \text{ m}^3/\text{min}$), usuwające pozostałości perforacyjne z otoczenia otworu i przedłużające kanały perforacyjne do kilku metrów w głąb formacji. Po początkowej perforacji, dodatkowe pompowanie azotu bądź płynów zabiegowych z podsadzką (lub bez niej) wydłuża powstałe szczeliny w głąb formacji.

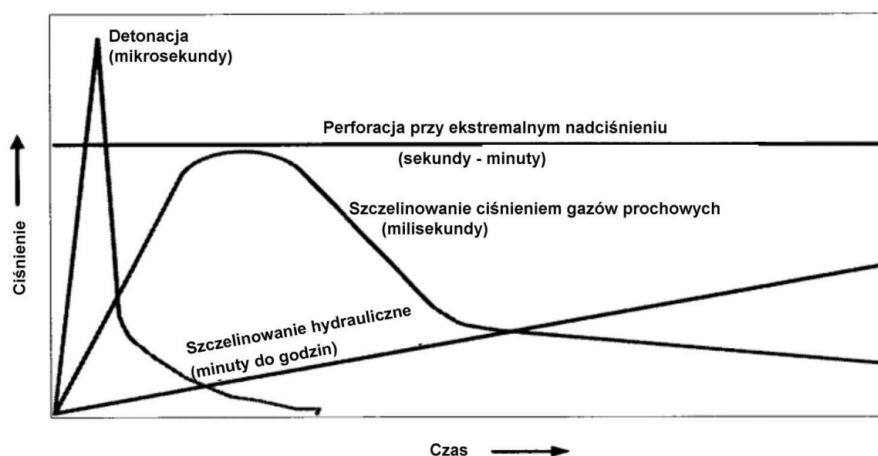
Poczynając od roku 1990, ekstremalne naciśnienie zostało ogólnie zaakceptowane i jest wykorzystywane jako technika perforacji – zwłaszcza w USA i Kanadzie. Następnie operatorzy kompanii serwisowych rozszerzyli zakres zastosowań, w których możliwe jest zrealizowanie dwóch procedur w jednym marszu do otworu, zauważając przy tym, że poprzez połączenie procesów uzyskiwane są zwiększone korzyści dla każdego z nich z osobna. Wśród procedur udostępniania, które mogą być łączone z perforacją przy ekstremalnym naciśnieniu,

można wymienić między innymi: wypełnianie filtrów żwirowych, konsolidację piasków żywicami, przepłukiwanie istniejących perforacji gwałtownym przepływem, kwasowanie i szczelinowanie. Dla przykładu, połączenie perforacji z wypełnieniem filtra żwirowego poprzez wprowadzanie żywicy przy wysokiej energii wspomaga konsolidację utworów wokół otworu wiertniczego. Stąd też takie połączone zastosowania nie tylko pozwalają generować korzyści ekonomiczne poprzez zmniejszenie ilości marszów do otworu, ale również określają stopień powodzenia procedur, w porównaniu z indywidualnym zastosowaniem tych technik.

Technologia perforacji przy ekstremalnym naciśnieniu zmniejsza uszkodzenie formacji we wrażliwych na typ płynu zbiornikach gazu uwięzionego (*tight-gas*), jakie może nastąpić w przypadku konwencjonalnych procedur udostępniania. Objętość cieczy w kolumnie rur wydobywczych można minimalizować i zastępować azotem, który ostatecznie może być wypierany przez zatłaczanie gazu.

Wśród innych korzyści można wymienić także lepszą interpretację odpowiedzi formacji na obróbkę szczelinowaniem, co pozwala na podejmowanie właściwych decyzji dotyczących głównych operacji stymulacji (jeżeli konieczne jest zastosowanie szczelinowania hydraulicznego) oraz umożliwia bardzo dobre oszacowanie otworów rozpoznawczych.

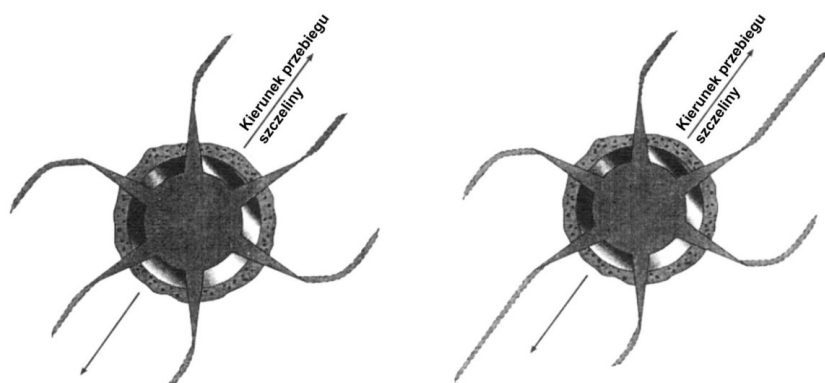
Zależność ciśnienia wglębnego od czasu dla czterech metod stymulacji przedstawia rysunek 1. Zgodnie z tym wykresem, materiały wybuchowe i pędne wywierają wysokie ciśnienie na perforację (odpowiednio w mikro- i milisekundowych okresach czasu), które szybko rozprasza się do horyzontu podlegającego obróbce. W szczelinowaniu hydraulicznym obciążanie perforacji następuje powoli,



Rys. 1. Zależności ciśnienia wglębnego od czasu dla materiałów wybuchowych, pędnych, szczelinowania hydraulicznego i perforacji przy ekstremalnym naciśnieniu [12]

w okresie od kilkunastu minut do kilku godzin. W technologii ekstremalnego nadciśnienia zachodzi szybkie obciążanie perforacji wysokim ciśnieniem, utrzymującym się na tyle długo, aby utworzyć czyste szczeliny, rozciągające się od czubków kanałów perforacyjnych. Stąd też każdy kanał perforacyjny jest przedłużany i stymulowany oddzielnie, dając w efekcie szczeliny biegnące promieniowo od perforacji i realizujące stymulację strefy przyotworowej.

Szczeliny tworzone przez kanały perforacyjne ułatwiają zapoczątkowanie szczelinowania hydraulicznego, wykonywanego po zabiegu perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu. Stwierdzono, że w otworach gdzie wykonywano zabieg w tej technologii, przy późniejszym szczelinowaniu hydraulicznym, ciśnienie konieczne do zapoczątkowania tworzenia szczeliny było o 3,5 do 9 MPa mniejsze niż w sąsiadujących otworach, które perforowano przy podciśnieniu w otworze. Rysunek 2 ilustruje, że w metodzie tej szczeliny wydłużają się osiowo względem kanałów perforacyjnych, a później stopniowo zwracają się w kierunku maksymalnego naprężenia poziomego.



Rys. 2. Szczeliny w zabiegu perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu wydłużają się od kanałów perforacyjnych, stopniowo układając się w kierunku maksymalnego naprężenia poziomego [12]



Rys. 3. W szczelinowaniu hydraulicznym szczeliny nie zawsze stanowią przedłużenie kanałów perforacyjnych [12]

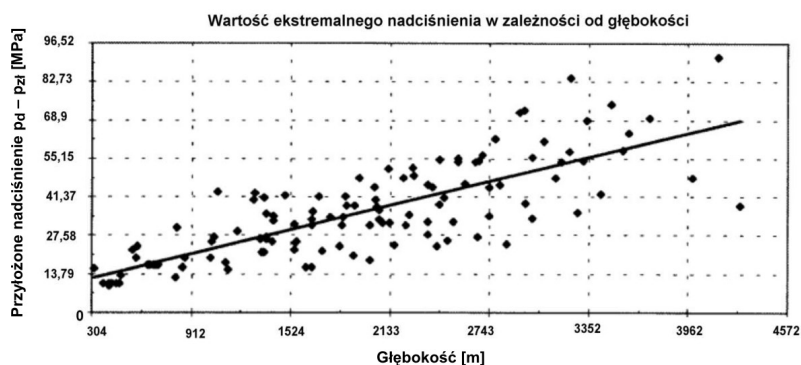
W przypadku szczelinowania wykonywanego w otworach sperforyowanych przy podciśnieniu, perforacje są obciążane powoli, umożliwiając wydłużanie się szczelin w kierunku maksymalnego naprężenia poziomego. Kierunek ten nie musi być zgodny z kierunkiem kanałów perforacyjnych, stąd też może powstawać kręta ścieżka przepływu płynu za rurami okładzinowymi i przez płaszcz cementowy, co może zmniejszać skuteczność tworzonych szczelin. Rysunek 3 przedstawia kierunek NE-SW przebiegu szczeliny hydraulicznej zapoczątkowanej z perforacji o fazowaniu 60 stopni.

Zestawienie zabiegów wykonywanych w technologii ekstremalnego nadciśnienia [12]

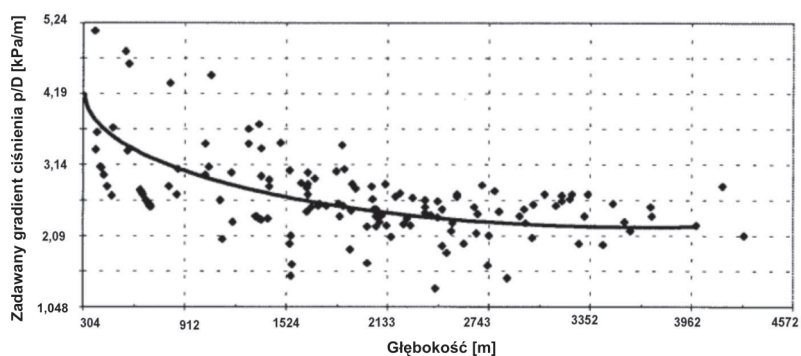
Zebrano dane z ponad 160 zabiegów wykonanych przez firmę Halliburton w latach 1993–1996, obejmujących informacje o horyzontach opróbowywanych – takie jak typ, głębokość, przepuszczalność, skin i perforowany interwał, jak również: typ płynu stosowanego w zabiegu, zastosowane nadciśnienie i jego gradient, ciśnienie powierzchniowe przed i po zabiegu, oraz dane o azocie, kwasie, podsadzkach i typach płynów nośnikowych. Na podstawie tych danych wykreślono nadwyżkę ciśnienia, stanowiącą różnicę pomiędzy ciśnieniem zadaniem w otworze a ciśnieniem złożowym, w funkcji głębokości. Z wykresu przedstawionego na rysunku 4 widać trend, narastający wraz ze wzrostem głębokości. Oznacza to, że wielkość nadciśnienia wymagana w głębszych otworach przewyższa wzrost ciśnienia złożowego.

Rysunek 5 przedstawia gradient zadanego ciśnienia w funkcji głębokości formacji. Ten wykres wskazuje zastosowanie wyższych gradientów ciśnienia w płytszych otworach. W tabeli wyników, na podstawie których powstał wykres, przytoczona jest wartość gradientu sięgająca 63,5 kPa/m, zastosowanego w płytko zalegającym (320 m) horyzoncie.

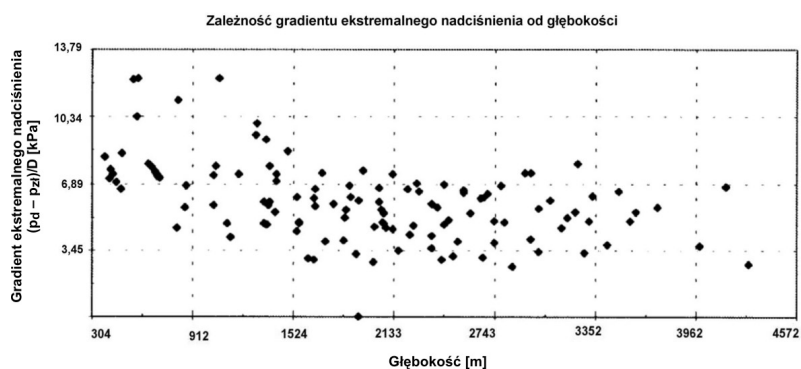
Normalizacja danych przedstawionych na rysunku 4, poprzez podzielenie ich przez głębokość zalegania formacji, daje w efekcie nadwyżkę gradientów ciśnienia, zaprezentowaną na rysunku 6, który przedstawia interesujący trend, gdzie większość danych z głębokości od ok. 1500 m do 4250 m mieści się w wąskim przedziale. Wartości średnie oraz najbardziej prawdopodobne zakresy dla tych



Rys. 4. Zadawane wartości nadciśnienia otworowego stosowane w technologii perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu [12]



Rys. 5. Zadawane gradienty ciśnienia stosowane w zabiegach perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu [12]



Rys. 6. Gradienty ekstremalnego nadciśnienia stosowane w zabiegach EOBP [12]

gradientów ciśnienia, w funkcji głębokości, są oszacowane dla szeregu interwałów głębokości i podane w tabelicy 1. Ta charakterystyka może być wykorzystana do określania średniej wartości ekstremalnego nadciśnienia, wymaganego dla różnych formacji na różnych głębokościach.

Tabela 1. Typowe zakresy gradientów nadciśnienia [12]

Głębokość [m]	Gradient nadciśnienia $(p_d - p_z)/D$ [kPa/m]	
	średnio	zakres
0÷912	28,3	17÷39,6
912÷1520	22,6	14,7÷28,3
1520÷4560	17,0	11,3÷22,6

Procedury perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu

Wysokie ciśnienia, wiążące się ze stosowaniem technologii EOBP, wymagają zwrócenia szczególnej uwagi na bezpieczeństwo i szczegóły procedur, w celu zagwarantowania bezpiecznego i pomyślnego przebiegu zabiegu. Technika ta wymaga zmodyfikowanych narzędzi i wyposażenia, przystosowanych do zastosowań wysokociśnieniowych:

1. Po zapuszczeniu przewodu produkcyjnego, płyn znajdujący się w otworze jest wypierany azotem, jednak część

cieczy pozostaje na spodzie przewodu. Ta objętość cieczi ułatwia zapoczątkowanie tworzenia szczelin i przedłużenie kanałów perforacyjnych po odpaleniu perforatora. W większości operacji, cieczą pozostawioną na spodzie w interwale ustawienia perforatora w celu zapewnienia dalszej poprawy jest kwas, którego zadaniem jest oczyszczenie resztek i filtra płuczki w strefie przyotworowej. Kwas reaguje również z formacjami

węglanowymi i poprawia efektywność udostępnienia, poprzez wytrawianie perforacji i powierzchni szczelin. Do celów tych stosuje się również płyn zabiegowy z dodatkami zmniejszającymi tarcie, stabilizatorami ilitu, olejem napędowym, rozpuszczalnikami lub metanolem – umieszczanymi na spodzie przewodu. Do płynu na spodzie przewodu można również dodawać podsadzkę, w dalszym stopniu erodującą i powiększającą kanały perforacyjne.

2. Uruchamiany jest program kontrakcji rur wydobywczych, w celu oszacowania sił hydraulicznych występujących w trakcie operacji. Należy podejmować działania takie jak: dodawanie dodatkowych obciążników w celu zwiększenia ciężaru lub zwiększanie ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej azotem, w celu zmniejszenia ryzyka pęknięcia rur wydobywczych bądź odpinania pakera.
3. Następnie ciśnienie w otworze jest zwiększane z powierzchni do wstępnie obliczonego poziomu z zastosowaniem azotu ponad kolumną cieczy. Płyn w otworze może być dowolną kombinacją gazu i cieczy, jednak najlepiej aby w interwale planowanej perforacji znajdowała się kolumna cieczy, zapewniając masę niezbędną do przedłużania kanałów perforacyjnych. Zwiększanie objętości gazu zwiększa energię potrzebną do przyspieszenia masy płynu w otworze, zwiększa energię denną oraz początkową prędkość zatłaczania w momencie wykonania perforacji. W każdym przypadku zwiększanie objętości gazu zwiększa ciśnienie na powierzchni, niezbędne do osiągnięcia danego ciśnienia dennego.
4. Ciśnienie denne należy zwiększyć przed wykonaniem perforacji za pomocą azotu, do poziomu przekraczającego ciśnienie szczelinowania formacji. Branagan i Wilmer [2] stosowali nadwyżkę 13,79 MPa ponad ciśnienie szczelinowania formacji. Handren et al. [9] zalecali stosowanie minimalnego gradientu ciśnienia dennego wynoszącego 9 kPa/m powyżej gradientu szczelinowania albo typowego gradientu ciśnienia wynoszącego $24,9 \div 31,4$ kPa/m przed perforacją. Dane przedstawione w tabeli 1 można po prostu użyć do oszacowania wymaganego ekstremalnego nadciśnienia w otworze na różnych głębokościach. Na podstawie historycznych zabiegów można stwierdzić, że w płytszych otworach typowo stosowane są nadciśnienia o gradiencie przekraczającym 33,9 kPa/m.
5. Następuje odpalenie perforatora, a sprężone płyny w otworze przedłużają utworzone kanały perforacyjne o 2÷3 m. Proces inicjowania szczelin w formacji skalnej trwa tylko kilka sekund, do momentu rozładowania

nadwyżki ciśnienia w formacji i osiągnięcia przezeń wartości ciśnienia szczelinowania. W celu dalszej poprawy stymulacji strefy przyotworowej stosowane jest dodatkowe pompowanie azotu lub płynów szczelinujących.

6. W otworach z istniejącymi już perforacjami montuje się zrywaną przeponę w końcówce rur wydobywczych, zamiast stosować perforator zapuszczany na przewodzie. Ciśnienie azotu pompowanego do rur wydobywczych zrywa przeponę przy wstępnie zadanym ciśnieniu i następuje gwałtowny napływ do perforacji.

Narzędzia i techniki

W wielu przypadkach do wykonania zabiegu perforacji w technologii ekstremalnego nadciśnienia niezbędne są specjalnie modyfikowane narzędzia i wyposażenie. Zazwyczaj konieczne jest zastosowanie przewodu wydobywczego i pakera, do odizolowania rur okładzinowych powyżej pakera od ciśnień zadawanych przez przewód wydobywczy, w celu utworzenia nadciśnienia. Pięć poniższych metod klasyfikuje różne narzędzia i techniki powszechnie stosowane w technologii ekstremalnego nadciśnienia. Mimo że obejmują one większość wyposażenia i sekwencji wykonywania zabiegów perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu, wykaz ten nie jest wyczerpujący.

1. Odpalenie perforatorów z zadaniem ekstremalnego nadciśnienia w przewodzie wydobywczym i rurach okładzinowych poniżej pakera oraz obróbka otworu.
2. Odpalenie perforatorów z zadaniem ekstremalnego nadciśnienia w przewodzie wydobywczym i rurach okładzinowych poniżej pakera, automatyczne odpięcie perforatorów oraz obróbka otworu.
3. Wykorzystanie urządzenia odpowietrzającego do odizolowania ciśnienia panującego w przewodzie wydobywczym od rur okładzinowych poniżej pakera, zwiększenie ciśnienia w przewodzie wydobywczym do niezbędnej wartości nadciśnienia, otworzenie urządzenia odpowietrzającego w celu połączenia przewodu z rurami okładzinowymi poniżej pakera, odpalenie perforatorów i obróbka otworu.
4. Zapuszczenie automatycznego urządzenia odpinającego perforatory, odizolowującego ciśnienie panujące w przewodzie wydobywczym od orurowania okładzinowego poniżej pakera. Zadanie ekstremalnego nadciśnienia w przewodzie wydobywczym i odpalenie zespołu perforatorów, który automatycznie zostaje zrzuty, a otwór podlega obróbce przez końcówkę przewodu wydobywczego. Ta metoda jest najszerszej stosowaną

techniką ekstremalnego nadciśnienia, w której wykorzystuje się narzędzie TCP (perforacji na przewodzie).

5. Zapuszczenie wieszaka perforatora z automatycznym zwalnianiem na przewodzie wydobywczym lub kablu geofizycznym. Perforatory są wówczas utrzymywane w interwale zabiegu na wieszaku, a otwór może być uzbrojony w rury wydobywcze lub może obyć się bez nich. Zadaje się wówczas ekstremalne nadciśnienie do otworu i odpala perforatory. Zespół perforujący zostaje automatycznie zrzucony, a otwór jest obrabiany przez przewód wydobywczy lub rury okładzinowe. Ta technika zapewnia najmniejsze przewężenie wgłębne dla przepływu, bez konieczności zapuszczania przewodu wydobywczego. Jest korzystna dla otworów głębszych, w których stosowane są przewody produkcyjne mniejszych rozmiarów. Technika ta jest również korzystna dla otworów udostępnionych z użyciem rur traconych. W tym scenariuszu paker jest zapinany w rurach okładzinowych powyżej rur traconych do perforacji, w których stosowany jest perforator o największej możliwej średnicy.

Pierwsze cztery z wymienionych technik można podzielić na dwie kategorie, na podstawie łączności pomiędzy przewodem wydobywczym a rurami okładzinowymi w momencie poprzedzającym perforację. Dla każdego przypadku zespół perforujący może być pozostawiony na spodzie przewodu wydobywczego lub zrzucony do rząpia dzięki zastosowaniu automatycznego urządzenia do zwalniania perforatorów.

1. **Przestrzenie przewodu wydobywczego i rur okładzinowych są ze sobą połączone przed perforacją.** W niektórych zastosowaniach nie jest konieczne użycie urządzenia odpowietrzającego (zaworu) do wykonania zabiegu – dzieje się tak m.in. w przypadkach, gdy konieczne jest wprowadzenie płynów zabiegowych do przewodu wydobywczego, a denne ciśnienie zabiegu może być zadawane na rury okładzinowe, paker i inne wyposażenie wgłębne bez uszkodzenia rur okładzinowych. W tych przypadkach w zespole wgłębnym montuje się otwarty zespół perforujący poniżej pakera, umożliwiając napelnienie przewodu wydobywczego płynem otworowym w miarę zapuszczania całego zespołu do otworu. Z chwilą wykonania odpowiedniego rozmieszczenia płynów i zapięcia pakera zwiększa się ciśnienie w rząpiu otworu oraz w przewodzie wydobywczym do wcześniej określonego ekstremalnego nadciśnienia i odpala perforator przez wrzucenie poprzez służę zbijaka, uruchamiającego głowiczkę mechaniczną lub hydro-mechaniczną. Można również wykorzystać głowiczkę

uruchamianą ciśnieniowo, w wersji natychmiastowej lub zwłocznej. W tym drugim przypadku możliwe jest jeszcze uzyskanie innego (większego) nadciśnienia w czasie zwłoki po uruchomieniu głowiczki.

2. **Przestrzenie przewodu wydobywczego i rur okładzinowych nie są połączone ze sobą przed perforacją.** W niektórych przypadkach zadawanie nadmiernego ciśnienia na rury okładzinowe poniżej pakera nie jest pożądane. Może to wynikać z niskiej odporności rur okładzinowych na ciśnienie wewnętrzne, istnienia otwartych perforacji lub uszkodzenia rur okładzinowych albo ich znacznego wieku. W tego typu przypadkach typowy system zawierałby urządzenie zaworowe pewnego typu pod pakerem. Urządzenie to umożliwi zamknięcie przewodu wydobywczego w trakcie jego zapuszczania do otworu i ładowania z powierzchni. Po zapięciu pakera i umieszczeniu w przewodzie wydobywczym niezbędnych płynów zadawane jest ciśnienie, w celu wytworzenia właściwego, ekstremalnego nadciśnienia do perforacji. Perforatory mogą być odpalone przez wrzucenie zbijaka do przewodu wydobywczego i uruchomienie głowiczki typu mechanicznego lub zadanie ciśnienia na głowiczkę uruchamianą ciśnieniowo. Spadający zbijak uruchamia urządzenie zaworowe, gdy przemieszcza się przezeń i odłamuje korek zrywany. Odległość od takiego urządzenia zaworowego do głowiczki zapalnikowej wynosi normalnie około 10 metrów, dlatego też zbijak odpali perforatory z pewnym opóźnieniem względem otwarcia zaworu. Jeżeli do odpalenia perforatorów zastosuje się ciśnienie to urządzenie zaworowe i głowiczka odpalająca mogą stanowić jeden zespół. Wówczas ciśnienie zadane w przewodzie wydobywczym jednocześnie otwiera zawór i uruchamia głowiczkę zapalnikową. Podobnie jak w poprzednio omawianych przypadkach można zastosować automatyczne urządzenie zwalnające perforator; wówczas nie jest konieczne stosowanie urządzenia zaworowego pod pakerem. Po odpaleniu perforatora zostaje on zrzucony do rząpia, zapewniając łączność z rurami okładzinowymi poprzez końcówkę przewodu wydobywczego, poprzez którą zachodzi obróbka.

Przykłady zastosowań technologii perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu

Pierwsze prace

Pierwsze udane prace w tej technologii zostały wykonane przez wprowadzenie 500 galonów (1890 litrów) 15-proc. kwasu solnego w przeznaczonym do perforacji

interwale węglanowym i powyżej niego. W zewnętrznych rurach okładzinowych 8 5/8" wytworzono ciśnienie za pomocą solanki, po czym odpalono perforator zapuszczony na kablu o długości ok. 10 m, przy gradiencie ciśnienia równoważnym ok. 20 kPa/m (180% gradientu ciśnienia szczelinowania). Ale zmagazynowana energia była tutaj bardzo mała – brak czapki gazowej. Niemniej efekt był pozytywny i porównywalny z uzyskanym na sąsiadujących otworach, gdzie wykonano kwasowania o wielkiej objętości z zastosowaniem uszczelnaczy kulkowych oraz urządzeń do izolowania interwałów z podwójnym pakerem.

Przykłady zastosowania – Góry Skaliste, Marathon Oil [15]

Około 60% zabiegów przy ekstremalnym nadciśnieniu wykonano w otworach o głębokości poniżej 5000 stóp (1524 metry), w horyzontach produktywnych węglanowych i piaskowcowych. Wiele z formacji produkcyjnych zawiera zarówno porowatość szkieletu, jak i szczelinowatość, a otwory mają kilka interwałów udostępnienia. Powszechnie występują niskie ciśnienia denne, wynoszące typowo od 3,45 MPa do 6,2 MPa. Stwierdzono, że w takich warunkach perforacja wykonana przy podciśnieniu byłaby nieskuteczna, nie mogąc zapewnić łączności wszystkich interwałów z otworem.

Poprzednia praktyka na tych otworach wiązała się z etapową perforacją na kablu wszystkich interwałów w otworze (w zależności od ogólnej strategii udostępniania), po czym zastosowaniem kwasowania przy izolowaniu poziomów za pomocą kulek, albo zastosowaniem pokerowych urządzeń płuczących do stymulowania krótkich odcinków interwału. Były to metody czasochłonne i kosztowne, a największy problem stanowił fakt komunikacji pozarurowej z silnie szczelinowatymi interwałami zawodzionymi.

Metoda stymulacji przy ekstremalnym nadciśnieniu stała się rutynową metodą udostępniania, gwarantującą skuteczne połączenie wszystkich interwałów z otworem przed przeprowadzeniem dużych prac stymulacyjnych w tych interwałach o niskiej przepuszczalności.

Wśród osiągniętych, korzystnych wyników można wymienić:

- większość stref w próbie produkcyjnej dawała wydatki porównywalne do podobnych interwałów kwasowanych wielkimi objętościami HCl lub HF w sąsiadujących otworach,
- większość otworów zachowała izolację między poziomami, nawet jeżeli warstwy oddzielające miały zaledwie 3 metry miąższości, podczas gdy w przeszłości trudno było to uzyskać przy przekładkach o miąższości 6 lub nawet 9 metrów,

- otwierane były wszystkie interwały, niezależnie od niekorzystnych właściwości skał,
- w trakcie dalszych prac stymulacyjnych stwierdzano znacznie mniejsze przepływy poza rurami i zmniejszenie produkcji wody.

W obszarach, gdzie wrażliwość płynów zawartych w formacji skalnej nie stanowi większego problemu, perforację wykonuje się na kablu strzałowym nawet w dużych interwałach (ogółem 100 m), bez środków zamykających istniejące kanały perforacyjne. Z zasady stosowane są rury wydobywcze o średnicy 4,5 cala, w celu maksymalizacji objętości sprężonej poduszki azotowej – a zatem i dysponowanej energii szczelinowania.

Zabiegi wykonywane przy ekstremalnym nadciśnieniu z zastosowaniem podsadzki

Pierwsze próby wprowadzania podsadzki do szczelin w zabiegach przy ekstremalnym nadciśnieniu polegały na pompowaniu azotu i podsadzki bezpośrednio po utworzeniu szczelin przez gwałtowny napływ płynu; oceniano jednak, że takie podejście może powodować rozrost szczelin poza pożądaną strefę i ryzyko dotarcia do wody podścielającej.

Wstępne próby włączenia podsadzki do płynu zabiegowego wiązały się z zastosowaniem lepkiego systemu polimerowego. Procedura polegała na pompowaniu szlamu obciążonego podsadzką i wrzucaniu kuli zamykającej przepływ przez zawór, ścinany później pod działaniem różnicy ciśnień. Po osadzeniu się kuli dalsze pompowanie azotu zwiększało różnicę ciśnień i doprowadzało do ścięcia kółka przy obliczonym ciśnieniu. Zmagazynowana energia i rozprężanie się kolumny azotu powodowało zatłaczanie szlamu (obciążonego podsadzką) do formacji, jednak po zabiegu stwierdzano, że około 85% zastosowanej podsadzki znajdowało się w rzępiu otworu.

W kolejnych próbach wprowadzono kilka modyfikacji, polegających na:

- zmniejszeniu stężenia podsadzki z ośmiu do czterech funtów na galon,
- jako płyn przenoszący podsadzkę zastosowano polimer o nazwie Xanvis, zamiast płynów boranowych,
- zwiększono objętość azotu poprzez zastosowanie rur wydobywczych o średnicy zewnętrznej 4,5 cala, zamiast dotychczas używanych rur wydobywczych o średnicy zewnętrznej 3,5 cala,
- zwiększono gradienty ciśnienia gwałtownego napływu do dwóch psi/stopę.

Do dnia dzisiejszego tak prowadzone prace nie stwarzają problemów z osadzaniem się podsadzki ponad kulą

przed ścięciem zaworu, a większość podsadzki jest wprowadzana do formacji.

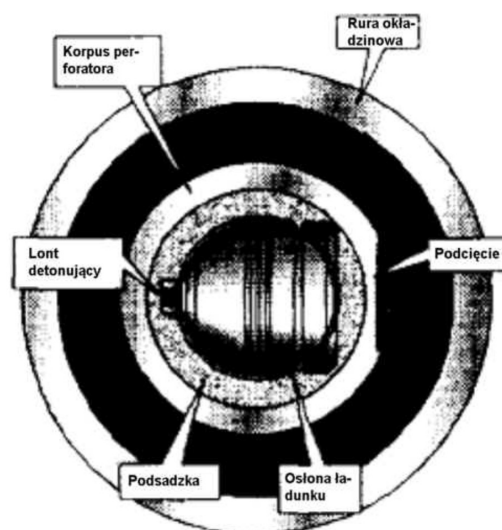
Systemy przenoszenia podsadzki

Można z łatwością przewidzieć, że wysokie natężenia zatłaczania przez szczeliny o niewielkiej rozwartości (szczególnie w piaskowcach) mogą potencjalnie poprawiać przewodność w strefie przyotworowej dzięki erozji cząstek ze ścianek szczeliny. Z tego powodu uznaje się, że techniki ekstremalnego nadciśnienia będą skuteczne, zwłaszcza w piaskowcach. Uważano również, że wprowadzenie podsadzki lub cząstek erodujących do strumienia płynu o wysokiej energii mogłoby usprawnić oczyszczanie ścianek szczeliny, a następnie podierać formację. Pożądane jest, aby w zastosowaniach perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu wykonywanej na przewodzie wprowadzać podsadzkę do strumienia płynu w momencie detonacji oraz w ciągu kilku następnych sekund, gdy poziomy ciśnienia i natężenia przepływu utrzymują się nadal na ekstremalnych poziomach. Nie jest to tak łatwe do zrealizowania jak w przypadku systemów z zaworem ścinanym, biorąc pod uwagę, że perforacja na przewodzie jest przede wszystkim pożądana w formacjach wrażliwych na rodzaj płynu oraz w krótszych interwałach perforowanych (mniej niż ok. 25 m).

Realizacja zadania włączenia podsadzki w operacje perforacji na przewodzie szybko wykluczyła użycie podsadzek zawieszonych cieczach, ponieważ:

- czas zawieszenia wymagany w przypadku operacji na przewodzie jest niepewny,
- płyny nośnikowe w takim zastosowaniu musiałyby być bardzo lepkie; wprowadzanie takich polimerów do formacji nie jest pożądanym i stwarza ryzyko jej uszkodzenia,
- nie zawsze dysponuje się wystarczającą wiedzą o systemach płynów, które ostatecznie mogłyby być zbyt drogie do nabycia, wymieszania i umieszczenia w interwale zabiegu.

Problem rozwiązano przez opracowanie specjalnego układu przenoszenia podsadzki, w którym odpowiedni korpus rurowy wypełniony jest podsadzką uwalnianą w momencie odpalenia perforatorów. Zastosowano w nim ładunek kierunkowy, który przebija otwór w rurze, stanowiącej obudowę nośnika podsadzki – nie naruszając rury okładzinowej. Podsadzka jest uwalniana zarówno wybuchowo – w momencie odpalenia, jak również przez następujący po tym strumień płynu przepływającego przez układ przenoszenia podsadzki i docierającego do interwału perforacji (rysunek 7).



Rys. 7. Przekrój nośnika podsadzki. W momencie detonacji specjalny ładunek kierunkowy przebija podcięcie w rurze nośnika bez uszkodzenia rury okładzinowej, nawet jeżeli układ nie jest wyśrodkowany w rurze [15]

Stwierdzono, że takie rozwiązanie jest najlepsze z następujących powodów:

- większość wyposażenia jest gotowa i łatwo dostępna,
- taki układ jest względnie tani,
- można zastosować nośnik podsadzki o praktycznie dowolnej długości,
- łatwo jest przeszkolić pracowników serwisu do posługiwania się tym sprzętem,
- jeżeli jest to pożądanym, do podsadzki można dodawać znaczniki (np. izotopowe), w celu późniejszego pomiaru zasięgu utworzonych szczelin,
- można dobierać wielkość i ilość otworów w nośniku, w celu regulowania szybkości uwalniania podsadzki, a co najbardziej istotne;
- w charakterze płynów zabiegowych można stosować szeroki wybór nieuszkodzających otworu układów bez polimerów (takich jak alkohole i solanki).

Jako materiał podsadzkowy stosowano boksyt (20/40), mając na uwadze, że jest to materiał, którego cząsteczki mają właściwości bardzo silnie erodujące. Istniała obawa, że płyny o niskiej lepkości mogą nie przetransportować boksytu (o dużym ciężarze) do formacji. Dlatego też w pierwszym zabiegu dokonano radioaktywnego znakowania podsadzki i stwierdzono występowanie w formacji materiału oznakowanego, jakkolwiek nierównomiernie rozmieszczonego.

Ta technika wykonywania zabiegów została zastosowana w serii czterech otworów Hill Sand, Haynesville Field (Północna Luizjana) – z doskonałymi wynikami. Pole to jest wrażliwe na rodzaj płynu i cechuje się względ-

nie wysoką przepuszczalnością (20 mD) w interwałach odsłonięcia piaskowców. W pierwszych zastosowaniach nośnika podsadzki zastosowano ok. 635 litrów środka powierzchniowo-czynnego na bazie ropy, jako jedyną ciecz zabiegową zatłaczaną do formacji. W efekcie uzyskano samoczynną produkcję ropy w trzech otworach na cztery, a w czwartym – otwór wodny o wysokiej produkcji. Wszystkie sąsiednie otwory (niezależnie czy perforowane przy podciśnieniu i/lub stymulowane poprzez szczelinowanie pianą) dawały mniejsze wskaźniki produkcji przy eksploatacji pompowej.

Następnie stosowano tę technikę w ponad 70 zabiegach, z zachęcającymi wynikami – zwłaszcza w przypadkach, gdy istotne było uniknięcie połączenia stymulowanej warstwy z blisko leżącymi interwałami wodonośnymi. W takich przypadkach zaleca się natychmiastowe zaprzestanie zatłaczania azotu gdy tylko nośnik podsadzki/perforator na przewodzie zostanie odpalony, co ogranicza możliwość pionowego rozwijania się szczelin. Efekty prac wykonywanych w Kanadzie i USA wskazują, że podsadzka z nośników jest wprowadzana do formacji. Profilowania znaczników radioaktywnych wykazują ich obecność w formacji, a w wydobywanych nośnikach nie pozostają resztki podsadzki i nie stwierdza się też jej istotnych ilości w spągu otworów.

W dalszej kolejności prowadzono prace w celu lepszego rozpoznania ilości i typu szczelin tworzonych techniką ekstremalnego nadciśnienia, w zabiegu zaprojektowanym w taki sposób, że poprzez zawór ścinany zatłaczano żelowy układ kwasowy zawierający radioaktywnie znakowaną podsadzkę. Poziomy nadciśnienia wynosiły około 33,9 kPa/m (200% gradientu szczelinowania). Następnie wykonano profilowanie znaczników w interwałach, które uprzednio były perforowane z gęstością 18 strz./m i fazowaniem 60°. Analiza profilowania wskazała, że wszystkie interwały uległy stymulacji, jakkolwiek wielkość odpowiedzi radioaktywnej zmienia się pomiędzy nimi. Następnie wykonano profilowanie kierunkowe znaczników radio-

aktywnych, stwierdzając na podstawie jego interpretacji, że w najwyższym interwale utworzona została szczelina dwuskrzydłowa i że nie wszystkie sześć płaszczyzn perforacji uległo stymulacji.

W toku tych zabiegów wypracowano pewne zalecenia technologiczne, które można streścić w następujących punktach:

1. Zaleca się zakotwiczenie rur wydobywczych, np. przez połączenie kołnierzone do choinki prewentera, lub umieszczenie kołnierza rur wydobywczych bezpośrednio poniżej jego zasuw. W przypadku, gdy nominalne ciśnienia uzbrojenia głowicy są za niskie należy stosować urządzenie do odizolowania głowicy otworu.
2. Należy zawsze umieszczać zawór nadmiarowy na przestrzeni pierścieniowej i podciągnąć linie upustowe tak, aby w przypadku awarii pakera lub innego urządzenia funkcjonowały nadal.
3. W przypadku stosowania perforacji na przewodzie, zaleca się stosować głowicę zapalnikową uruchamianą ciśnieniem bezwzględny, bez opóźniacza hydraulicznego.
4. Jeżeli stosowane jest urządzenie do odizolowania głowicy odwiertu, zawory – takie jak zawór do tłokowania, powinny pozostawać otwarte (wówczas w przypadku przecieku choinka nie zostanie narażona na oddziaływanie nadmiernego ciśnienia).
5. Należy zatrudniać doświadczony personel – co zapobiegnie problemom w trakcie wykonywania zabiegów.
6. Należy projektować zabiegi przy najwyższym poziomie nadciśnienia i największej możliwej ilości azotu lub innego gazu ściśliwego. Firma Marathon Oil zaleca obecnie minimalny gradient 1,4 psi/stopę jako wskaźnik projektowy i zamierza ignorować gradienty szczelinowania jako parametr projektowy.
7. Zaleca się stosować nieuszkodzające systemy płynów.
8. Pracując z płynami o zwiększonej energii należy przestrzegać procedur bezpieczeństwa wskazanych przez przedsiębiorstwo serwisowe.

Podsumowanie

1. Przedstawiono podstawy technologiczne prowadzenia zabiegu perforacji w technologii ekstremalnego nadciśnienia, z rozbięciem na różne przypadki konstrukcji odwiertu i wyposażenia wgłębnego. Przedstawiono sposób rozwijania się szczelin w skałach podlegających obróbce oraz metody wprowadzania podsadzki.
2. Na podstawie danych literaturowych o zabiegach wykonanych w tej technologii, przedstawiono zalecenia dotyczące stosowanych gradientów ciśnień, płynów zabiegowych i konfiguracji uzbrojenia wgłębnego odwiertów, jak również zalecenia technologiczne prowadzenia zabiegów, wraz z elementami bezpieczeństwa.

Artykuł nadesłano do Redakcji 4.03.2011 r. Przyjęto do druku 28.04.2011 r.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Józef Raczkowski

Literatura

- [1] Bartusiak R., Behrmann L.A., Halleck P.M.: *Experimental investigation of surge flow velocity and volume needed to obtain perforation cleanup*. J. Pet. Sc. & Eng., 17, 19–28, 1997.
- [2] Branagan P.T., Wilmer R.H.: *Procedury inicjowania szczelin zaprojektowane do minimalizacji uszkodzenia naturalnie szczelinowatego zbiornika*. SPE 17716, Gas Technology Symposium, Dallas, 13–15.06.1988.
- [3] Das S.K., Sharma M.M., Schechter R.S.: *Adhesion and hydrodynamic removal of colloidal particles from surfaces*. Particle Science and Technology, 13, 227–247, 1995.
- [4] Devinder S. Arora, Mukul M. Sharma: *Charakter strefy zgniecionej wokół kanałów perforacyjnych*. Publikacja SPE 58720.
- [5] Freitas A.M., Sharma M.M.: *Effect of surface hydrophobicity on the hydrodynamic detachment of particles from surfaces*. Langmuir, 15, 2466–2476, 1999.
- [6] Gruesbeck C., Collins R.E.: *Entrainment and deposition of fine particles in porous media*. SPE JI., grudzień 1982.
- [7] Halleck P.M., George J., Bast M.: *The character and distribution of damage around perforations: comparison of balanced and underbalanced conditions*. Publikacja SPE przedstawiona na SPE Eastern Regional Meeting, West Virginia, 20–22.10.1999.
- [8] Halleck P.M.: *Advances in understanding perforator penetration and flow performance*. Publikacja SPE 27981 przedstawiona na SPE Petroleum Engineering Symposia na University of Tulsa, Tulsa, OK, 29–31.08.1994.
- [9] Handren P.J., Jupp T.B., Dees J.M.: *Overbalance Perforating and Stimulation Method for Wells*. Publikacja SPE 26515 przedstawiona na Dorocznej Konferencji i Wystawie Technicznej SPE, Houston, 3–6.10.1993.
- [10] Hsia T.Y., Behrmann L.A.: *Perforating skin as a function of rock permeability and underbalance*. Publikacja SPE 22810, przedstawiona na 66th Annual Technical Conference, Dallas, TX, 6–9.10.1991.
- [11] Kooijman A.P., Hoek P.J.V., Kenter C.J.: *Horizontal wellbore stability and sand production in weakly consolidated sandstones*. Publikacja SPE 36419 przedstawiona na Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 6–9.10.1996.
- [12] Mehdi Azari, Burleson J. i in.: *Well testing and evaluation of tubing-conveyed extreme overbalanced perforating*. Publikacja SPE 37326, 1997.
- [13] Pucknell J.K., Behrmann L.A.: *An investigation of the damaged zone created by perforating*. Publikacja SPE 22811, 1991.
- [14] Sharma M.M., Chamoun H., Sarma S.R., Schechter R.S.: *Factors controlling the hydrodynamic detachment of particles from surfaces*. J. of Colloidal and Interface Science, vol. 149, nr 1, 1.03.1992.
- [15] Snider P.M., Hall F.R., Whisonant R.J.: *Experiences with high energy stimulations for enhancing ner-wellbore conductivity*. Publikacja SPE 35321, 1996.
- [16] Tariq S.M.: *New, generalized criteria for determining the level of underbalance for obtaining clean perforations*. Publikacja SPE 20636 przedstawiona na 65th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, 23–26.09.1990.
- [17] Venkitaraman A., Behrmann L.A.: *Qualitative analysis of perforation – induced gravel – pack impairment experiments*. Publikacja SPE przedstawiona na SPE European Formation Damage Meeting, Haga, Holandia, 2–3.06.1997.



Mgr inż. Antoni FRODYMA – absolwent Wydziału Wiertniczo-Naftowego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Kierownik Zakładu Techniki Strzelniczej INiG Kraków. Zajmuje się konstruowaniem sprzętu strzałowego do otworów wiertniczych i technologią jego stosowania. Współautor kilku patentów i wzorów użytkowych.