

Antoni Frodyma

Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Uwarunkowania wykonywania zabiegów perforacji w odwiercie przy podciśnieniu

Minimalizacja uszkodzenia warunków przyływu i ograniczenia przepuszczalności, powodowanych przez uszkodzenie towarzyszące perforacji, ma podstawowe znaczenie dla jej skuteczności. W standardowych procedurach udostępniania przyjmuje się stosowanie względnie wysokiej różnicy ciśnień lub podciśnienia, w celu wyeliminowania lub zminimalizowania uszkodzenia perforacyjnego. Jednak jakość oczyszczenia kanałów perforacyjnych wcale nie jest wprost proporcjonalna do wielkości podciśnienia zastosowanego w trakcie zabiegu. Artykuł przedstawia mechanizmy powstawania uszkodzenia perforacyjnego przepuszczalności oraz metody stosowane w celu ich niwelowania. Podano zalecenia ciśnieniowe do projektowania zabiegów perforacji różnego typu i w różnych sytuacjach geologiczno-technicznych, opracowane na podstawie badań polowych i studiów modelowych cytowanych w literaturze. Pokazano również efekty stosowania różnych wartości podciśnienia na stopień oczyszczenia kanałów perforacyjnych dla skał piaskowcowych i wapiennych, zobrazowane metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej. Artykuł zamyka krótka dyskusja i wnioski.

Conditions for successful underbalance perforation job completion

Minimisation of inflow conditions damage and permeability reduction resulting from perforation induced damage is vital for perforation effectiveness. In recent year industry engineers usually apply relative high pressure difference or underbalance in order to eliminate or minimise perforation induced damage. Quality of perforation tunnels cleaning is not, however, directly proportional to magnitude of underbalance applied. The study presents mechanisms of perforation induced permeability damage, and methods used in order to reduce them. Pressure criteria recommendations for designing perforation jobs of various types and in different geological and technical conditions, worked out on the grounds of literature sources have also been given. The work ends with presentation of perforation results performed at various underbalance values in sandstone and limestone reservoir rocks, obtained by means of computed X-ray tomography, concluded with short discussion.

Wprowadzenie

Produktywność orurowanych i sperforowanych odwiertów zależy w znacznym stopniu od zasięgu perforacji i sprawności przepływu. Przebicia uzyskiwane przez perforatory z ładunkami kierunkowymi zależą silnie od charakteru celu (przebijanej skały i zespołu: płyn-orurowanie-cement), jak również przyłożonego nań skutecznego naprężenia. Przebicie uzyskiwane w warunkach wgłębnych jest zazwyczaj znacznie

mniejsze niż to, które mierzy się w cementowych celach próbnych w warunkach powierzchniowych. Znany jest również fakt uszkodzenia przepuszczalności przez ładunki kierunkowe, wiążący się prawdopodobnie z udarami mechanicznymi, głęboką filtracją drobnych cząstek z otworu do formacji skalnej, obecnością szczątków skalnych i poperforacyjnych w kanale perforacyjnym oraz efektami przepływu wielofazowego.

Mechanizm powstawania strefy uszkodzenia perforacyjnego

Perforacje są tworzone ładunkami kierunkowymi, których detonacja powoduje powstanie strugi metalicznych cząstek o wysokiej prędkości, przebijającej otwór przez rury okładzinowe, cement i skałę. Kanał perforacyjny jest tworzony przez odrzucanie materiału skalnego od osi tworzonego kanału, pod wpływem ciśnienia strugi kumulacyjnej. Na czubku strugi kumulacyjnej tworzona jest fala uderzeniowa, rozchodząca się promieniowo na zewnątrz. Ciśnienia

tworzone przez tą falę w pobliżu kanału perforacyjnego są więcej niż wystarczające do spowodowania pęknięcia skały. Tworzy to typową materię skalną, skojarzoną ze strefą uszkodzenia perforacyjnego (zmiażdżone ziarna, itp.). W miarę promieniowego rozchodzenia się fali, ciśnienie jakie ona tworzy maleje, wskutek rosnącej powierzchni jej oddziaływania i zużycia energii na kruszenie skały. Zostaje osiągnięty punkt, w którym ciśnienie fali uderzeniowej nie może być wyższe od

wytrzymałości skały. Takie punkty wyznaczają koniec „strefy zmiażdżonej”.

Aby zapewnić miejsce dla tworzonego kanału perforacyjnego, skała jest odrzucana promieniowo na zewnątrz. Prędkość z jaką tworzony jest kanał jest tak duża (około 2000 m/s), że skała nie odkształca się przez tworzenie widocznych szczelin. Zamiast tego osiągane jest tworzenie wielkiej ilości mikropęknięć, rozprzestrzeniających się przez ziarna skały i pomiędzy nimi. W pobliżu czubka (końca) kanału perforacyjnego szybkość perforacji maleje, umożliwiając niekiedy wzrost większych szczelin, biegnących od czubka kanału perforacyjnego.

Na podstawie cienkich przekrojów i porozymetrii rtęciowej stwierdzono, że w obrębie strefy uszkodzonej perforacją struktura porowa skały zostaje zakłócona. Duże pory są niszczone w wyniku mikroszczelinowania lub napełniane spękanymi odłamkami ziaren, w szczególności w pobliżu kanału perforacyjnego.

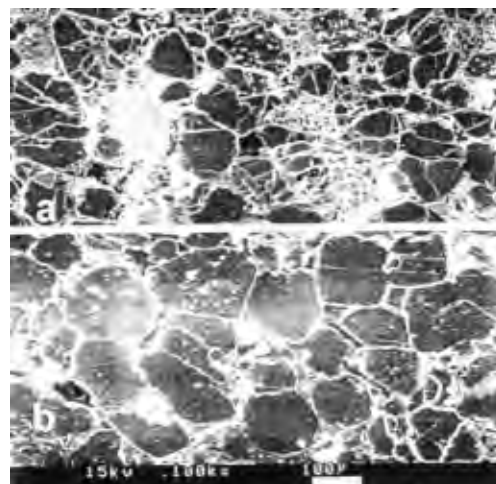
Z uwagi na prędkość z jaką tworzona jest strefa zmiażdżenia, nie następuje zmiana porowatości. Strefa ta jest tworzona z prędkością większą od prędkości dźwięku, stąd brak jest czasu na usunięcie cieczy znajdującej się w przestrzeni porowej. Ciecz w przestrzeni porowej nie może być wyciśnięta z porów, ani nie można zmniejszyć jej objętości. Dlatego też objętość porowa, którą zajmuje musi być zachowana. Inny wynik może być uzyskany w przypadku przestrzeni porowej wypełnionej gazem, który jest płynem o znacznie większej ściśliwości.

Dodatkowym zjawiskiem, związanym z perforacyjnym uszkodzeniem przepuszczalności, jest uszkodzenie szczelin naturalnych.

Na podstawie uzyskanych wyników porozymetrii rtęciowej stwierdzono, że wielkie pory w strefie uszkodzenia perforacyjnego są zastępowane małymi, co powoduje zmniejszenie przepuszczalności. Zjawisko to jest uznawane za główną przyczynę zmniejszenia przepuszczalności w strefie uszkodzonej perforacją (rysunek 1) [9].

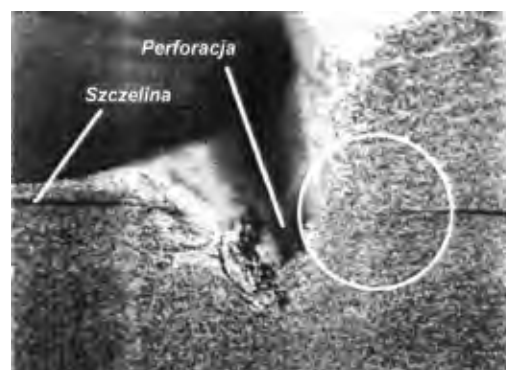
Zwracano również uwagę, że formacje gazonośne są bardziej wrażliwe na uszkodzenie perforacji, niż formacje roponośne. Może to wiązać się ze ściśliwością gazu w strefie zmiażdżonej w trakcie perforacji, która umożliwia jej skompaktowanie w większym stopniu.

Przyjmuje się, że jeżeli perforacja przecina szczelinę naturalną, to tworzone jest połączenie systemu szczelinowego z otworem. W takim przypadku uszkodzenie przepuszczalności ścianek perforacji nie miałoby znaczenia, ponieważ przepływ omijałby takie uszkodzenie



Rys. 1. Porównanie tekstury piaskowca Berea a) 3 mm od osi perforacji, b) 28 mm od osi perforacji [9]

poprzez system szczelinowy. Ostatnie dane doświadczalne wykazują jednak, że perforacja może dwójako uszkadzać system szczelinowy. W pewnych okolicznościach metal strugi kumulacyjnej może wnikać do szczeliny i zmniejszać jej przewodność. Naprężenia udarowe odkształcają skałę otaczającą, zamykając szczelinę w miejscu jej przecięcia przez perforację. Na rysunku 2 pokazano fotografię takiego przecięcia. Szczelina została wypełniona żywicą epoksydową po perforacji. Zamknięcie szczeliny w pobliżu perforacji zilustrowane jest w otoczonej okręgiem części ilustracji [9].



Rys. 2. Fotografia przecięcia wcześniej istniejącej szczeliny i perforacji, ilustrująca zamknięcie szczeliny w pobliżu kanału perforacyjnego. Fotografia obejmuje obszar około 5 cm szerzej [9]

Kontrolowanie uszkodzenia perforacyjnego

W przemyśle naftowym pojawiły się trzy techniki poprawy sprawności przepływu poprzez perforacje. Są to: przepłukiwanie perforacji, perforacja przy ekstremalnym nadciśnieniu oraz perforacja przy podciśnieniu, która jest najczęściej stosowana. W technikach przepłukiwania

perforacji stosuje się różne narzędzia do wymuszania krążenia płynów zabiegowych przez kanały perforacyjne, w celu usunięcia luźnych pozostałości. Są one najpowszechniej stosowane w utworach nieskonsolidowanych, w których luźny piasek w kanałach perforacyjnych może pogarszać sprawność kolejnych operacji tworzenia filtra zwirowego.

Perforacja przy ekstremalnym nadciśnieniu to niedawno opracowana technika, której zadaniem jest przezwyciężenie uszkodzenia perforacyjnego poprzez tworzenie krótkich (~10 m) szczelin przez każdą perforację. W metodzie tej wykorzystuje się energię zgromadzoną w otworze wiertniczym, na przykład w formie sprężonego gazu, w celu propagacji szczelin zapoczątkowywanych udarem strugi kumulacyjnej. Powstające krótkie szczeliny mogą być częściowo podsadzane przez punktowe rozmieszczanie zawiesziny podsadzkowej w interwale udostępniania przed zabiegiem perforacji. Uważa się, że tworzą one ścieżkę przewodzenia przekraczającą uszkodzenie perforacyjne.

Perforacja w warunkach podciśnienia w odwiercie

Perforacja przy podciśnieniu lub wykonywanie zabiegu perforacji przy ciśnieniu w odwiercie niższym niż ciśnienie w udostępnianej formacji jest ogólnie uznawane za jedną z najlepszych metod tworzenia otwartych, nieuszkodzonych kanałów perforacyjnych. W ciągu kilku mikrosekund, które zajmuje ładunkowi kierunkowemu utworzenie kanału perforacyjnego, skupiona fala ciśnienia przebija otwór przez rurę okładzinową i formację skalną. Na drodze tej fali ciśnieniowej materiał jest odrzucany na bok, a część formacji skalnej otaczającej powstający kanał perforacyjny może ulegać zbitciu. Wynikające stąd zmiążdżenie formacji wokół kanału perforacyjnego może zmniejszać początkową przepuszczalność nawet o ponad 70%. Niektórzy autorzy odnotowali występowanie strefy zmiążdżonej, otaczającej kanały perforacyjne, uznając że jest ona w stanie wprowadzać tak duże uszkodzenie przepuszczalności, iż może ono całkowicie wstrzymać produkcję. Do usuwania tego uszkodzenia lub zmniejszenia jego stopnia stosowano powszechnie zabiegi kwasowania. W przypadku wykonania perforacji przy podciśnieniu, różnica ciśnień pomiędzy złożem a otworem pomaga usunąć tę zmiążdżoną otoczkę skalną kanału perforacyjnego bardziej skutecznie, niż płukanie.

Różnica ciśnień, niezbędna do usunięcia uszkodzenia z kanału perforacyjnego, zależy od ciśnienia

Perforacja przy podciśnieniu stała się standardową praktyką na podstawie prac Bella [5] i innych autorów. Uważa się, że gwałtowny napływ płynu przy perforacji podciśnieniowej poprawia sprawność przepływu na trzy sposoby:

- gwałtowny napływ ze złoża zapobiega inwazji płynów z otworu i drobin w okresie pomiędzy perforacją a obniżeniem poziomu w otworze, w celu zapoczątkowania produkcji,
- gwałtowny napływ usuwa w części lub w całości szczątki z kanału perforacyjnego,
- gwałtowny napływ usuwa w części lub w całości uszkodzenie przepuszczalności matrycy skalnej, otaczającej kanał perforacyjny.

Procedura ta znalazła ogólne potwierdzenie w warunkach połowych. Kwestią do rozstrzygnięcia pozostaje: wielkość podciśnienia jakie należy zastosować, jaka jest konieczna objętość gwałtownego napływu, oraz czy procedura ta jest skuteczna we wszystkich sytuacjach geologiczno-technicznych.

i natężenia przepływu; zazwyczaj leży ona w zakresie od 500 do ponad 4000 psi (3,5 do 27,6 MPa) i była początkowo określana na każdym złożu na podstawie metody prób i błędów.

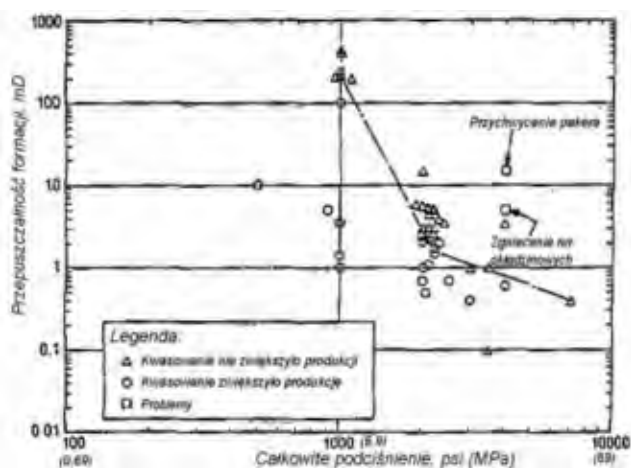
Określanie wartości podciśnienia na podstawie skuteczności zabiegu kwasowania

Opracowanie wykonane przez King G.E. i in. [12], na podstawie informacji zebranych dla 90 otworów, które zostały sperforowane przy podciśnieniu, a następnie opróbowane, poddane kwasowaniu i ponownie opróbowane, miało na celu określenie minimalnej wartości podciśnienia niezbędnego do uzyskania nieuszkodzonych perforacji. Optymalizacja wielkości stosowanego podciśnienia jest niezbędna z uwagi na to, że nadmierne podciśnienie może spowodować zgniecenie rur okładzinowych albo rozpad skały zbiornikowej – szczególnie w sytuacjach, gdy cementowanie albo formacja skalna są słabe.

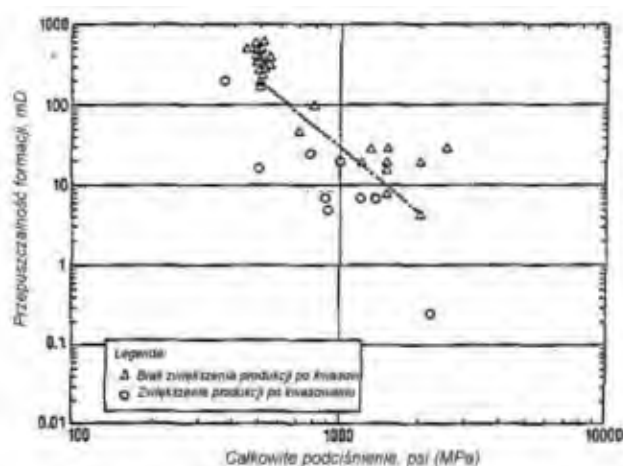
Próby przewidywania niezbędnej wartości podciśnienia na podstawie przepuszczalności wykonał Bell, który szacował zakresy podciśnienia zarówno na podstawie przepuszczalności formacji, jak i wydajności otworu. W celu osiągnięcia większej dokładności przeprowadzono analizę danych z otworów perforo-

wanych techniką zapuszczania na przewodzie, które udostępniały produktywne utwory piaskowcowe; po zabiegu perforacji wykonywano opróbowanie, kwasowanie i ponowne opróbowanie [12]. W przypadku gdy kwasowanie zwiększało wydajność produkcji o 10% lub więcej – uznawano, że perforacje były uszkodzone. Gdy produkcja z otworu po kwasowaniu nie ulegała zwiększeniu jw. – uznawano, że perforacje były czyste. Na przytoczonych poniżej wykresach nie uwzględniano takich utworów jak wapień i piaskowce wapniste, w których kwasowanie rutynowo zwiększa nieuszkodzoną przepuszczalność o więcej niż o kilka procent. Wartości podciśnienia określano jako ciśnienie złożowe minus ciśnienie hydrostatyczne słupa płynu w rurach wydobywczych, jeżeli taki występował. Dane przepuszczalności określono na podstawie badań rdzeni lub z testów odbudowy ciśnienia.

Po wykreśleniu danych przepuszczalności i podciśnienia na wykresie logarytmiczno-logarytmicznym (rysunek 3 dla gazu i rysunek 4 dla ropy) [12], minimalne podciśnienie niezbędne do oczyszczenia kanałów perforacyjnych (w przypadku gdy kwasowanie nie spowodowało zwiększenia produkcji z otworu) można uzyskać na podstawie linii rozdzielającej dwa zbiory danych. W otworach gazowych (rysunek 3) korelacja pomiędzy wartością podciśnienia i przepuszczalnością wydaje się być istotna dla wartości przepuszczalności do około 2 mD. Poniżej wartości 2 mD udane zabiegi perforacji były wykonywane przy znacznie wyższych wartościach podciśnienia. Jak zauważają liczni autorzy, do skutecznego oczyszczenia perforacji konieczna jest progowa wartość podciśnienia oraz natężenia przepływu. Przy niskich przepuszczalnościach przepływ zachodzący przez matrycę skalną może być zbyt niski



Rys. 3. Wartości podciśnienia stosowane w perforacji na przewodzie w piaskowcowych warstwach gazonośnych [12]



Rys. 4. Wartości podciśnienia stosowane w perforacji na przewodzie w piaskowcowych warstwach roponośnych [12]

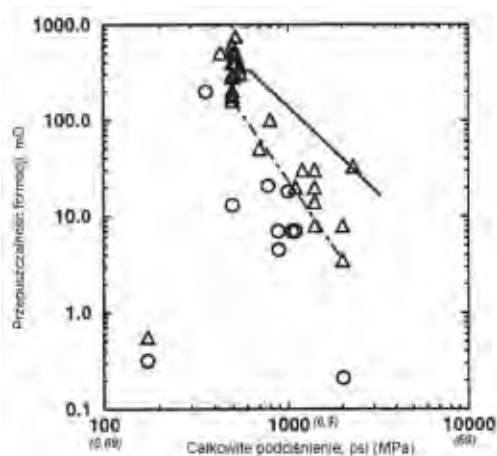
do oczyszczenia kanałów perforacyjnych, niezależnie od zastosowanej wartości podciśnienia.

Trzeba zauważyć, że w świetle nowszych badań laboratoryjnych [9] określane w ten sposób wartości podciśnienia wymaganego do oczyszczenia kanałów perforacyjnych są zaniżone. W eksperymentach laboratoryjnych poszukuje się raczej warunków dla uzyskania zerowego skin-efektu, podczas gdy w badaniach polowych Kinga poszukiwano tylko warunku braku wpływu kwasowania na produkcję otworu. Ten ostatni warunek w rzeczywistości wcale nie musi reprezentować zerowego skin-efektu perforacji.

W celu rozszerzenia tych wyników na szerszy zakres utworów i uwiarygodnienia ich jako praktycznych wytycznych, konieczne jest silniejsze oparcie mechaniki, leżącej u podłoża perforacji przy podciśnieniu, na podstawach teoretycznych. Prace te rozpoczął Tariq [19], stawiając hipotezę, że oczyszczenie kanału perforacyjnego następuje gdy prędkość przepływu chwilowego w skale osiąga wartość krytyczną – sugerując, że odpowiednim parametrem dla określenia tej prędkości byłaby liczba Reynoldsa (definiowana dla mediów porowatych). Wykorzystując modelowanie metodą elementów skończonych, określił on tę krytyczną wartość liczby Reynoldsa na około 0,05.

Wielkość podciśnienia wymagana do realizacji oczyszczenia zależy więc od wybranej krytycznej prędkości przepływu, przepuszczalności skały uszkodzonej i nieuszkodzonej oraz od grubości strefy uszkodzonej. Wykonano serię badań z użyciem skał o różnych przepuszczalnościach, zmieniając wartość podciśnienia, w celu znalezienia podciśnienia wymaganego w każdym przypadku. Wyniki są przedstawione na rysunku

5, w zestawieniu z oryginalnymi danymi Kinga i in. [12]. Trendy są podobne, chociaż dane modelowe nie pokrywają się z danymi polowymi.



Rys. 5. Porównanie minimalnego ciśnienia wymaganego do oczyszczenia kanałów perforacyjnych wg obliczeń modelu Tariq (linia ciągła) z obserwacjami polowymi wg Kinga i in. [9]

Kryteria analityczne wartości podciśnienia dla uzyskania minimalnego uszkodzenia perforacji

L.A. Behrmann przedstawia w pracy [3] model analityczny „ciągłego oczyszczania”, w którym uszkodzenie perforacyjne jest usuwane ze ścianek kanału perforacyjnego do wewnątrz, po czym (przy pewnym promieniu kanału) występujące siły wleczenia są już niewystarczające do przemieszczania cząstek.

Do określenia krytycznej wartości siły wleczenia wykorzystano trzy zbiory danych: (1) z odpalenia ładunku 3,2 grama do rdzenia z piaskowca Berea o średnicy 100 mm, (2) z odpalenia ładunku 3,2 grama do rdzenia z piaskowca Gold o średnicy 100 mm, oraz (3) odpalenia ładunku 15 g do rdzenia z piaskowca Berea o średnicy 178 mm. Dane te posłużyły do korelacji wyników analitycznych z eksperymentalnymi, w wyniku czego konieczne było zmniejszenie zależności podciśnienia od średnicy kanału perforacyjnego (wykładnik 0,3). Po tej operacji zaproponowano następujące równania na obliczenie optymalnej wartości podciśnienia, dla uzyskania niemal zerowego skinu uszkodzenia perforacyjnego:

- dla skał o przepuszczalności $k > 100$ mD:

$$\Delta P = \frac{1480\varphi D^{0.3}}{k^{1/2}} \tag{1}$$

gdzie:

ΔP wyrażone jest w psi,

φ (porowatość połączona) – w procentach,
 D – średnica kanału perforacyjnego w mm,
 1480 – stała.

Jedną z wad zestawu danych, na których dokonano korelacji, jest mały zakres przebadanych przepuszczalności: piaskowiec Berea ma nominalną przepuszczalność 200 mD, a piaskowiec Gold – około 100 mD. Zastosowanie równania (1) do rdzeni z nisko-przepuszczalnych skał złożowych i wychodniowych daje bardzo wysokie wartości podciśnienia, w porównaniu do danych testowych. W celu dostosowania tego równania dla skał o niskiej przepuszczalności, zmniejszono zależność od przepuszczalności od $k^{0.5}$ do $k^{0.33}$. Dla skał o przepuszczalności mniejszej od 100 mD proponuje się następującą postać równania na wartość podciśnienia, dla uzyskania niemal zerowego skinu uszkodzenia przepuszczalności:

- dla skał o przepuszczalności $k < 100$ mD:

$$\Delta P = \frac{687\varphi D^{0.3}}{k^{1/3}} \tag{2}$$

W celu obliczenia pozostającego uszkodzenia perforacyjnego przy podciśnieniach mniejszych niż konieczne do całkowitego oczyszczenia perforacji, wynikające z podanych równań (1) i (2), proponuje się następujące równania:

- dla $k < 100$ mD

$$Skin_s = (CD/20)^2 \cdot (2,64 - 0,00395 \cdot \Delta P \cdot k^{1/3} / \varphi D^{0.3}) \tag{3}$$

- dla $k > 100$ mD

$$Skin_s = (CD/20)^2 \cdot (2,64 - 0,00183 \cdot \Delta P \cdot k^{1/2} / \varphi D^{0.3}) \tag{4}$$

$$D = EH_{N80} \cdot [3,27 - 0,61 \ln(UCS)], \text{ dla ładunków g\u0142\u0119boko penetruj\u0105cych} \tag{5}$$

gdzie: CD – średnica wkładki ładunku kierunkowego w mm, EH_{N80} to otwór wlotowy (cale) w rurze okładzinowej ze stali gatunku N80, zaś UCS to swobodna wytrzymałość skały na ściskanie, wyrażona w kpsi [3].

Zastosowanie proponowanych równań na podciśnienia oraz wartość pozostającego skinu pomoże odpowiedzieć na dwa, często stawiane pytania: 1) jaka jest wymagana wartość podciśnienia dla otrzymania czystych lub w 100% skutecznych perforacji, oraz 2) jeżeli nie jest możliwe uzyskanie optymalnego podciśnienia, to jaka jest oczekiwana wartość skin-efektu perforacji.

Należy pamiętać, że podane równania (3), (4) dotyczą współczynnika skinu dla pojedynczego strzału. Muszą one być przeliczane na skin-efekt dla złoża dla danej konfiguracji otworu, perforacji oraz zbiornika, do czego wymagane są symulatory napływu. Typowe dane wejściowe do takich symulatorów obejmują – oprócz głębokości perforacji, średnicy otworu wlotowego i właściwości skały zbiornikowej – również stosunek przepuszczalności w strefie uszkodzenia perforacyjnego do przepuszczalności skały rodzimej (k_{pd}/k) oraz grubość strefy uszkodzenia lub zmiążdżenia t_{pd} , które jak do tej pory były ogólnie zgadywane.

Jeżeli przyjąć rozległość uszkodzenia $t_{pd} = 0,6$ cala (1,52 cm), to do obliczenia równoważnego uszkodzenia przepuszczalności (k_{pd}/k) można zastosować wyrażenie:

$$k_{pd}/k = \ln(r_{pd}/r_p) / [\ln(r_{pd}/r_p) + Skin_s] \quad (6)$$

gdzie: $r_p = D/2$, a $r_{pd} = r_p + t_{pd}$

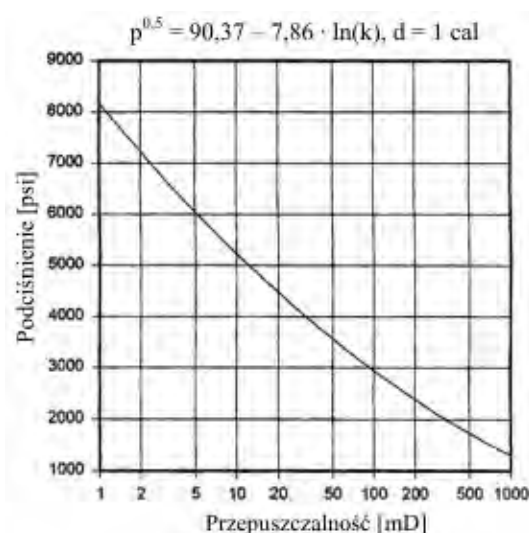
Porównanie wartości podciśnienia niezbędnych do uzyskania niemal zerowego skinu uszkodzenia perforacyjnego, obliczonych za pomocą wyprowadzonych równań, z danymi przedstawionymi przez Kinga [12] daje wartości od dwu- do czterokrotnie większe. Nie musi to budzić zaskoczenia, jako że King i in. w swojej pracy nie sugerują, że ich dane reprezentują brak uszkodzenia perforacyjnego, a jedynie fakt, że kwasowanie matrycy skalnej nie przynosi efektu jeżeli przy zabiegu perforacji zostanie zastosowane dostatecznie duże podciśnienie.

Dopasowanie krzywej danych przepuszczalności-porowatości ze zbiorników na Alasce i Brent na Morzu Północnym, zastosowane do równań (1) i (2), daje prosty związek wartości podciśnienia i przepuszczalności:

$$\Delta P = D^{0,3} [90,4 - 7,86 \cdot \ln(k)]^2 \quad (7)$$

przedstawiony również na rysunku 6.

Średnica kanału perforacyjnego nie jest rejestrowana w żadnych arkuszach danych, toteż w przeszłości stosowano średnicę otworu wlotowego (EH) jako wartość domyślną. Jednakże średnica otworu w skale jest funkcją wielkości ładunku oraz swobodnej wytrzymałości skały na ściskanie (UCS). Opracowano związek empiryczny na uśrednioną średnicę kanału, jako funkcję wielkości otworu wlotowego i swobodnej wytrzymałości skały na ściskanie, które przedstawia równanie 8 [4]:



Rys. 6. Optymalna wartość podciśnienia w funkcji przepuszczalności (złoża Brent Alaska i Morze Północne) [4]

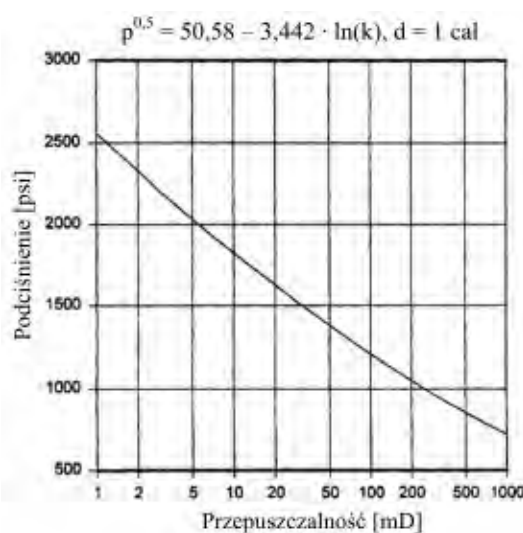
$$D = E_H \cdot [3,27 - 0,61 \cdot \ln(S_{uc})] \quad (8)$$

dla ładunków głęboko penetrujących, gdzie E_H – to średnica (cale) otworu wlotowego w rurach ze stali N80, a S_{uc} – to wartość UCS podana w kpsi.

Zastosowanie tej samej analizy do arenitów kwarcowych daje następujący związek podciśnienia i przepuszczalności (równanie 9 i rysunek 7):

$$\Delta P = D^{0,3} [50,6 + 3,44 \cdot \ln(k)]^2 \quad (9)$$

Równania (7) i (9) należy stosować z ostrożnością, ponieważ są one ekstrapolacjami danych laboratoryjnych dla skał wychodniowych na skały zbiornikowe z zastosowaniem związków przepuszczalność-porowatość,



Rys. 7. Optymalna wartość podciśnienia w funkcji przepuszczalności (arenity kwarcowe) [4]

o dużym rozrzucie danych. Jednakże ograniczone dane laboratoryjne dla niskoprzepuszczalnych arenitów kwarcowych oraz czystej, niskoprzepuszczalnej skały wychodniowej przy podciśnieniu 3000 psi (20,7 MPa) dały skin efekt uszkodzenia perforacyjnego zerowy do ujemnego, co sugeruje, że do czystych (niezailonych) piaskowców można stosować niższe wartości podciśnienia niż proponowane w powyższej analizie.

Warunki stosowania perforacji przy podciśnieniu

Aby zminimalizować powstawanie uszkodzonej perforacją strefy zmiążdżonej w udostępnianych naturalnie otworach wydobywczych i zatłaczających, perforację należy wykonywać przy podciśnieniu, jeżeli występuje dostatecznie duże ciśnienie złożowe i brak jest większych ograniczeń eksploatacyjnych. Jeżeli zostanie zastosowane podciśnienie o wartości mniej-

szej od optymalnej, to równania (3), (4), (6) można wykorzystać do oszacowania resztkowego uszkodzenia perforacyjnego i zdecydować, czy jest wymagany/uzasadniony zabieg stymulacji.

W przypadku wszystkich otworów zatłaczających i wydobywczych, względem których planowane są operacje szczelinowania hydraulicznego, sugeruje się wykonywanie przed operacją szczelinowania perforacji przy podciśnieniu, jeżeli nadmierne ciśnienie przebiecia/zatłaczania może stanowić potencjalny problem. Przy tym zaleceniu zakłada się, że istnieje wystarczające ciśnienie złożowe i przepuszczalność, pozwalające na wymywanie większości rozdrobnionego piasku z kanału perforacyjnego. Zalecane podciśnienie, podane równaniami (7) i (9), jest ogólnie wystarczające do usunięcia większości odłamków rozdrobnionego piasku, za wyjątkiem słabo scementowanych skał.

Uszkodzenia w formacji – porównanie dla formacji piaskowcowych i wapiennych [10]

Perforacja przy podciśnieniu jest techniką najczęściej stosowaną w celu zapobiegania i usuwania uszkodzenia przepuszczalności z kanałów perforacyjnych. Znaczny postęp w tej mierze został ostatnio uczyniony przez opracowanie modeli, które mogą przewidywać stopień oczyszczenia perforacji dla danej przepuszczalności formacji skalnej i wartości podciśnienia. Modele te obliczają chwilowy przepływ promieniowy do pustego kanału perforacyjnego i opierają się na zasadzie, że do usunięcia drobin ze skały otaczającej kanał perforacyjny wymagany jest pewna minimalna prędkość przepływu.

Mało uwagi jednak poświęcano mechanizmowi, poprzez który odłamki skalne i resztki ładunku są usuwane z kanału w celu jego oczyszczenia. To oczywiście wymaga występowania znacznego przepływu wzdłuż kanału perforacyjnego, w uzupełnieniu do przepływu promieniowego, postulowanego w bieżących modelach.

W celu uzyskania lepszego wglądu w mechanizm, przez który gwałtowny przyływ (wywołany podciśnieniem) usuwa uszkodzoną skałę i resztki ładunku z perforacji, oraz lepsze scharakteryzowanie pozostających uszkodzających materiałów (przy uwzględnieniu faktu, że dynamiczne pękanie występuje w inny sposób w różnych utworach), próbowano dokonać rozróżnienia pomiędzy tym zachowaniem w piaskowcach i wapieniach. W tym celu wykonano serię eksperymentów

przepływu przez perforacje w dwóch typach skał, przy kolejno narastających wielkościach podciśnienia. Po wykonaniu konwencjonalnych badań przepływu przez sperforowane próbki, przeprowadzono analizę metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej; w celu zaobserwowania rozległości, geometrii i morfologii resztek pozostających w kanale perforacyjnym [10].

Metoda badań

Do badań wybrano piaskowiec Berea i wapień Bedford (z Indiany), opierając się na dostępności danych eksperymentalnych i literaturowych dotyczących ich właściwości. Badania przepływu przez perforacje wykonano zgodnie z nieco zmodyfikowanymi procedurami podanymi w API RP19B, sekcja 4 [17]. Dane z tych pomiarów zostały następnie wykorzystane w połączeniu z zaobserwowanymi danymi przebiecia i danymi przepływu po perforacji, w celu obliczenia wartości współczynnika sprawności przepływu przez rdzeń dla każdego podciśnienia. Dla celów tych badań strzelanie prowadzono przy stałych warunkach promieniowego ciśnienia brzegowego. Takie warunki zbliżają się do odwzorowania sytuacji niskiej gęstości strzałów, przy małym uszkodzeniu otworu lub jego braku.

Po przeprowadzeniu perforacji i pomiarów przepływu, rdzenie zostały przebadane z zastosowaniem analizy rentgenowską tomografią komputerową (XCT)

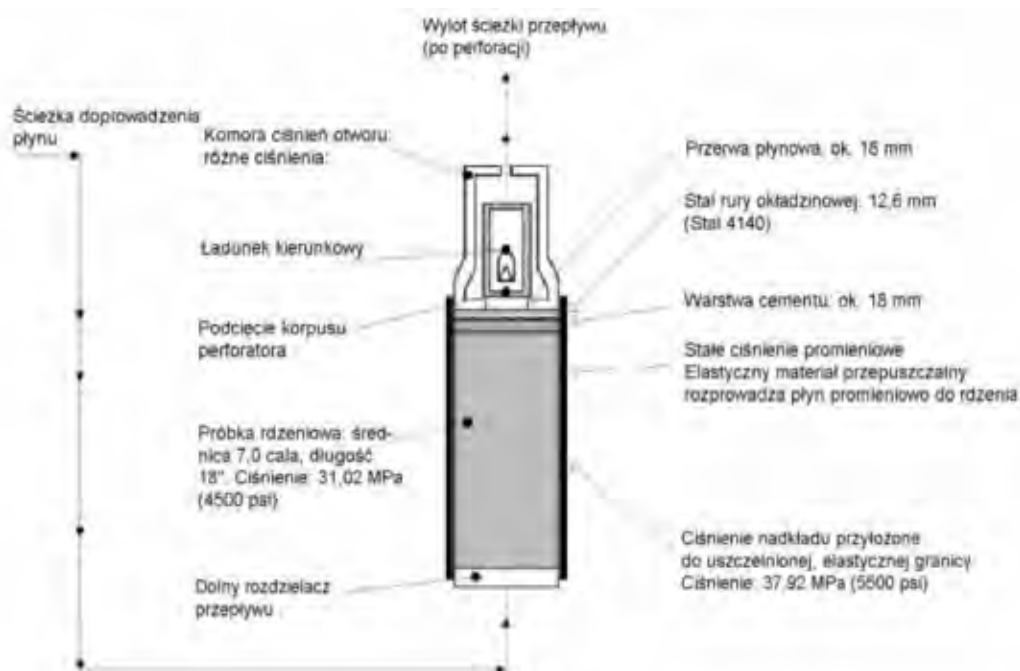
o wysokiej rozdzielczości, skanerem przemysłowym Universal Systems HD600. Dane zbierano z pięćdziesięciu linii detektorów, rekonstruując pięć plasterów równocześnie. Przy ustawieniu detektora w odległości 1090 mm od źródła, układ ten pozwolił uzyskać pełne pokrycie 3D wewnętrznej części 2/3 próbki plasterami o grubości ok. 0,7 mm, przy przekroju pikselu wynoszącym 0,25 x 0,25 mm.

Uzyskane dane zostały przedstawione w trzech wymiarach, z zastosowaniem kombinacji trzech pakietów oprogramowania. Pozwoliły one na wyodrębnienie wyróżniających cech, takich jak metal w otwartym kanale w obrębie obrazu próbki, przedstawionego w perspektywie 3D.

Wyniki i obserwacje

Wartości współczynnika sprawności przepływu przez rdzeń (*CFE*), obliczone w sposób podany powyżej, ujęto w tabeli w funkcji przyłożonego podciśnienia (tablica 1). Przytoczono również objętości metalu oraz otwartego kanału. Podawane są dwie wartości głębokości przebiccia – jedna na podstawie sondowania próbki, a druga z obserwacji XCT najgłębiej położonego fragmentu metalu. Podczas gdy ogólnie wykazują one zgodność, to jest kilka przypadków, w których głębokość wysondowana jest większa niż położenie tych cząstek metalu, które dotarły najgłębiej. Przypuszczalnie w tych przypadkach sztywna sonda przepycha się przez osłabioną skałę poza najdalsze cząstki metalu. Dla celów obliczania współczynnika *CFE* przyjęto długości kanału perforacyjnego, zmierzone sondą.

Te dane są niezupełnie takie jakich oczekiwano, ponieważ występuje początkowe obniżenie wartości *CFE* przy wzrastającej wielkości podciśnienia, przy najniższym *CFE* występującym dla podciśnienia o wartości 10,3 MPa (1500 psi). *CFE* rośnie przy wyższych



Rys. 8. Konfiguracja stanowiska do perforacji i badania przepływu po strzale w symulowanych warunkach otworowych [10]

wartościach podciśnienia zgodnie z oczekiwaniami, znajdując kulminację na niefizycznej wartości większej od jednego przy podciśnieniu o wartości 20,7 MPa (3000 psi).

Na rysunku 9 przedstawiono typowe wyniki z badania XCT dla tej serii prób, przy podciśnieniu wzrastającym ku dołowi. Dla każdej perforacji ilustracja uwidacznia odcinek otwartego kanału (ciemnoszary) oraz „zbitkę” metalowy pozostający w jego szczycie (pokazany jako jasnoszary). Występuje bardzo mała przerwa pomiędzy odcinkiem kanału a metalem, reprezentująca odcinek kanału wypełniony szczątkami skalnymi. Ta objętość nie jest widoczna na ilustracji, ponieważ jest nierozróżnialna od otaczającej skały, która została usunięta programowo. Zgodnie z oczekiwaniami ogólny trend jest taki, że objętość kanału perforacyjnego rośnie, a objętość metalu maleje przy wzrastającej wartości podciśnienia. Z przyczyn prawdopodobnie niezwiązanych z wielkością podciśnienia, ostatnie dwa przebiccia są krótkie.

Występują oznaki otwartej objętości wokół zewnętrznej powłoki zbitka metalowego; zarówno przy podciśnieniu 5,2, jak i 10,3 MPa (750 i 1000 psi). Zjawisko to pokazano bardziej wyraźnie na rysunku 10 dla badania przy podciśnieniu 5,2 MPa (750 psi). Przestrzeń pierścieniowa otacza tutaj (w połowie obwodu) metalowy zbitek. Jest to nowe zjawisko, które prawdopodobnie ujawnia część mechanizmu oczysz-

Tablica 1. Wyniki badania dla piaskowca Berea [10]

Podciśnienie [MPa]	Współcz. CFE	Objętość kanału [cm ³]	Objętość metalu [cm ³]	Przebiecie próbki [cm]	Przebiecie całkowite [cm]
5,2	0,91	10,5	2,6	12,6	12,2
6,9	0,79	14,0	0,4	15,4	16,2
10,3	0,62	10,7	2,8	15,7	15,2
13,8	0,82	10,3	1,6	14,7	16,1
17,2	0,94	13,4	0,7	9,7	8,1
20,7	1,25	13,6	0,5	10,6	9,6



Rys. 9. Objętości kanału (ciemnoszary) i metalu (jasnoszary) w piaskowcu przy wzroście podciśnienia [10]

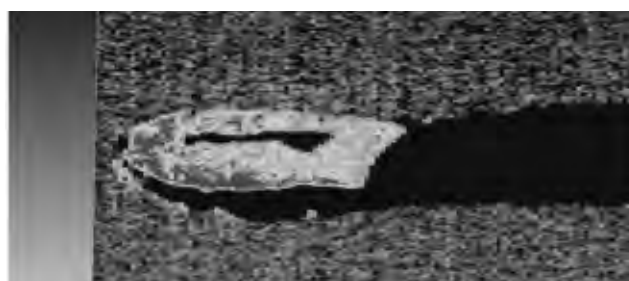


Rys. 10. Zbliżenie objętości kanału i metalu (po lewej) przy podciśnieniu 750 psi (5,2 MPa) oraz otwartej przestrzeni pierścieniowej wokół zbitki metalowej (po prawej, metal usunięto)

czania kanałów perforacyjnych poprzez gwałtowny napływ przy podciśnieniu.

Na rysunku 11 przedstawiono przekrój przez metalowy zbitkę. Wyraźnie widać na nim pierścieniową otoczkę na spodzie. Zmiana koloru metalowego zbitki oznacza, że gęstość metalu nie jest jednorodna. Podczas gdy istnieją obszary litego metalu, to znaczna jego ilość jest zmieszana z odłamkami skalnymi i szczątkami ładunku, co zmniejsza jego nieprzenikliwość dla promieniowania X. Należy o tym pamiętać interpretując ilościowe objętości metalu, ujęte w tablicy.

Na podstawie danych XCT możliwe jest ilościowe wyekstrahowanie objętości metalu i otwartego kanału perforacyjnego. Każdy obraz rentgenowskiej tomogra-



Rys. 11. Przekrój zbitki metalowej przy podciśnieniu 750 psi (5,17 MPa), uwidaczniający przestrzeń pierścieniową i zmiany gęstości metalu

fii komputerowej to w istocie dwuwymiarowa macierz wartości pochłaniania (określanych jako liczby *CT*), które są przetwarzane na obraz przez mapowanie koloru lub stopni szarości na te liczby. Pakiet sąsiadujących obrazów tworzy więc macierz 3D takich liczb, którą można badać ilościowo. Znając objętość przestrzeni lub woksela, reprezentowaną przez każdą liczbę, całkowitą objętość metalu możemy uzyskać przez proste wyszukanie i dodanie wszystkich wokseli, w których pochłanianie promieniowania X odpowiada metalowi. W rzeczywistości rysunki 9 i 10 są po prostu widokami perspektywnymi tak wyekstrahowanych objętości.

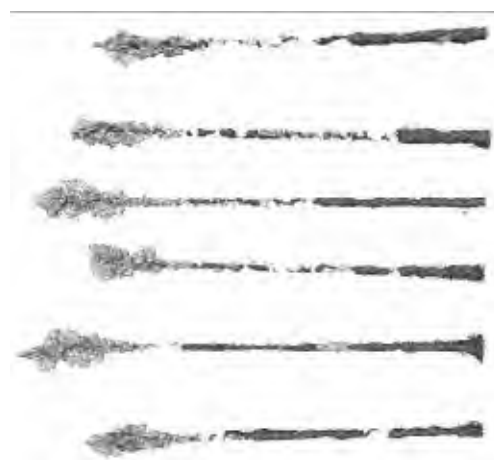
Ponieważ pochłanianie promieniowania X w metalu jest większe niż w skale, wyekstrahowanie objętości metalu jest sprawą wyboru progowej liczby *CT*. Dowolny wksel o liczbie *CT* przekraczającej ten próg jest uważany za reprezentujący metal. Zmienna gęstość zbitki metalowego (prawdopodobnie wskutek wymieszania cząstek metalu ze szczątkami skały i ładunku) sprawia, że wybór tej wartości progowej jest nieco dowolny. Dla celów tego badania wartość progową ustalono przez stopniowe jej zwiększanie do momentu, gdy wynikająca stąd dodatkowa zmiana objętości metalu była już znikoma. Taką samą operację wykonano dla ustalenia wartości progowej pomiędzy otwartym kanałem a skałą. Wartości tych obliczeń zestawiono w tablicy 1, wraz z wartościami współczynnika *CFE* i podciśnienia.

Istnieje dosyć wyraźny trend zmniejszania objętości metalu ze wzrastającą wartością podciśnienia. Przyrost objętości kanału nie jest wyraźny. Dwa krótsze przebicia przy wyższej wartości podciśnienia powodują zatarcie tego efektu w danych.

Dane podobnego badania, przeprowadzonego na próbkach wapienia, zestawiono w tablicy 2. Wartości *CFE* zgodnie z oczekiwaniami są znacznie zmniejszone w porównaniu do tych, jakie uzyskano dla próbek piaskowcowych o wysokiej przepuszczalności. Ponadto podciśnienia o wartości do 20,7 MPa (3000 psi) nie wykazują znaczącego oddziaływania na sprawność przepływu. Jednocześnie nie występuje znaczący trend; zarówno gdy chodzi o objętość tunelu, jak i objętość metalu przy zmieniającym się podciśnieniu. Objętość metalu i kanału perforacyjnego jest znacznie mniejsza niż w przypadku badań próbki z piaskowca Berea; mimo, że głębokości przebicia są ogólnie większe.

Morfologia perforacji, a w szczególności metalu w końcówce kanału perforacyjnego, jest całkowicie odmienna w tych badaniach, niż w przypadku rdzeni piaskowcowych. Na rysunku 12 przedstawiono zestaw perforacji z tej serii badań, ponownie pokazanych ku dołowi przy wzrastającej wartości podciśnienia. Część otwartego kanału perforacyjnego rozciąga się na około 40% długości perforacji. Metal w końcówce jest rozdzielony na liczne, małe przelomy, dając w efekcie zbitkę w formie kwiatostanu. Nie ma oznak występowania żadnej przestrzeni pierścieniowej wokół jakiegokolwiek fragmentu metalu.

Występuje duża przerwa pomiędzy częścią otwartego kanału perforacji, a metalem w jego końcówce. Ten niewidoczny rejon przedstawia kanał wypełniony odłamkami skalnymi, który jest nierozróżnialny od otaczającej skały (przy użyciu zastosowanych progów liczb *CT*).



Rys. 12. Objętości kanału (ciemnoszary) i metalu (jasnoszary) w wapieniu Bedford przy zwiększaniu podciśnienia [10]



Rys. 13. Kanał perforacyjny i metal przy podciśnieniu 3000 psi (20,68 MPa) w wapieniu Bedford

Perspektywiczny widok otwartego kanału i objętości metalu przy podciśnieniu o wartości 20,7 MPa (3000 psi) przedstawiono na rysunku 13. Obraz po lewej stronie pokazuje zarówno metal, jak i kanał widoczny od strony końcówki perforacji. Obraz po prawej stronie pokazuje sytuację po usunięciu metalu. W centrum metalowego zbitka występuje mała pustka, jednak nie ma wskazania powstawania kanału wokół zewnętrznej powierzchni metalu, jaki zaobserwowano w próbkach piaskowcowych.

Tablica 2. Wyniki badania dla wapienia Bedford

Podciśnienie [MPa]	Współczynnik CFE	Objętość kanału [cm ³]	Objętość metalu [cm ³]	Przebiecie próbki [cm]	Przebiecie całkowite [cm]
5,2	0,25	1,60	1,08	12,6	21,4
6,9	0,35	1,64	1,13	15,4	21,4
10,3	0,35	1,10	1,46	15,7	22,6
13,8	0,26	1,00	1,47	14,7	20,1
17,2	0,28	1,04	1,79	9,7	23,6
20,7	0,23	1,59	1,50	10,6	21,2

Dyskusja

Najnowsze modele oczyszczania perforacji skupiają się na chwilowym przepływie promieniowym do otwartego kanału. Uważa się, że jeżeli prędkość gwałtownego napływu jest wystarczająco wysoka (albo na podstawie początku „turbulencji” albo kryterium siły przemieszczania), to drobne cząstki zatykające są wymywane ze skały otaczającej kanał perforacyjny. Modele te są zgodne z obserwacjami polowymi i laboratoryjnymi, stwierdzającymi, że w formacjach o niższych przepuszczalnościach wymagane są większe wartości podciśnienia. Jednak wymagają one wyjaśnienia sposobu, w jaki początkowo formowany jest otwarty kanał perforacyjny.

Wyniki rentgenowskiej tomografii komputerowej dla piaskowca ilustrują, że wokół litego metalu „zbitka”, w czubku kanału perforacyjnego tworzy się przestrzeń pierścieniowa. Ma to z kolei dwie implikacje. Po pierwsze, musi istnieć składowa osiowa gwałtownego przepływu wokół zewnątrz metalowego zbitka. Po drugie, to z kolei implikuje, że istnieje strefa osłabionej skały otaczającej metal. Opróżnienie kanału przed metalowym zbitkiem, powodujące wysoki gradient ciśnienia osiowego na czubku, może wywoływać przepływ osiowy.

Aby ten przepływ mógł utworzyć przestrzeń pierścieniową, skała przez którą następuje przepływ musi być osłabiona, w porównaniu ze skałą otaczającą. Przedstawiane wcześniej mapy wytrzymałości skały w sąsiedztwie perforacji potwierdzają to przypuszczenie [8]. Dane te uzyskano z zastosowaniem zmodyfikowanego twardościomierza wgłębnikowego. Wykazują one stopniowe osłabianie skały w próbkach piaskowcowych, w miarę zbliżania się do ścianki kanału perforacyjnego.

Ocenia się, że oczyszczenie kanału perforacyjnego ze szczątków, a w szczególności z metalu w czubku perforacji, następuje poprzez gwałtowny przepływ osiowy, który rozluźnia materiał na tyle, że może on być następnie wypłukany z kanału. Dalsze oczyszczanie

uszkodzenia przepuszczalności w skałe otaczającej kanał perforacyjny następuje poprzez przepływ promieniowy do wewnątrz, postępujący w kierunku do czubka kanału perforacyjnego, w miarę jak oczyszczany jest sam kanał perforacyjny. Sekwencja oddziaływań pomiędzy gwałtownym przepływem osiowym wokół i przez szczątki w kanale oraz przepływu osiowego przez uszkodzoną skałę otaczającą kanał, będzie zależna od lokalnych zmian przepuszczalności, ściśliwości płynu i jego lepkości, a także od wytrzymałości skały rodzimej i uszkodzonej oraz od szczątków skalnych i ładunku.

Przebieg zjawiska w próbkach wapiennych różni się do zachodzącego w piaskowcu pod kilkoma względami. Po pierwsze, zgodnie z oczekiwaniami wynikającymi ze względnie niskiej przepuszczalności wapieni, wartości podciśnienia w badanym zakresie mają nikły wpływ na wartość współczynnika *CFE* lub objętość metalu i jedynie nieznaczny wpływ na objętość samego kanału. Fakt, że wokół metalowego zbitka nie występuje otwarta przestrzeń pierścieniowa sugeruje, że albo przepływ osiowy jest niewystarczający do usunięcia sąsiadującej z nim skały, albo też, że skała ta nie jest na tyle osłabiona, by mogła być usunięta przez taki przepływ. Prędkości gwałtownego napływu w wapieniach muszą być mniejsze, z uwagi na mniejszą przepuszczalność skały. Dodatkowo znane jest zjawisko pękania plastycznego kalcytu w warunkach udaru, tak więc podstawowym mechanizmem niszczenia w wapieniu jest płynięcie kryształów kalcytu. Niszczenie kalcytu zachodzi w drodze kataklazy (pękania ziaren), skutkując powstaniem bardziej rozdrobnionych i słabszych produktów pękania.

Efekt tych różnic oznacza, że w kanale perforacyjnym występuje niewystarczający przepływ do usunięcia wszystkich szczątków skalnych, oraz niewystarczający przepływ wokół metalu, do jego poluzowania. Duże pole powierzchni zbitka metalowego o złożonym kształcie w próbkach wapiennych jeszcze bardziej zmniejsza lokalną prędkość przepływu.

Wnioski

- Oczyszczanie próbek z piaskowca ze szczątków metalu zachodzi najpierw przez wypłukanie osłabionej skały wokół zbitka metalu, skutkując jego poluzowaniem.
- W piaskowcach objętości kanału perforacyjnego

wzrastają, a objętości resztek metalowych zmniejszają się przy wzroście podciśnienia. Występuje jedynie słaba korelacja pomiędzy tymi objętościami, a zmierzonymi współczynnikami sprawności przepływu przez rdzeń.

- Geometria zbitka metalowego w rdzeniu wapiennym bardzo różni się od tej, jaka występuje w próbkach piaskowcowych. Metal jest tutaj rozpraszany na wiele małych rozprysków, które nie są łatwe do usunięcia przez nagły przepływ.
- Nawet warunki dużego podciśnienia nie umożliwiają zwiększenia objętości otwartego kanału perforacyjnego, ani zmniejszenia objętości metalu w wapieniach, wskutek niskiej przepuszczalności tych ostatnich oraz skomplikowanej geometrii zbitka metalowego.
- W odniesieniu do przyczyn powstawania uszkodzenia perforacyjnego, przedstawiono kryteria ciśnieniowe prowadzenia zabiegu perforacji, obejmujące zakres zabiegu wykonywanego przy podciśnieniu. Kryteria te mają pomóc w takim projektowaniu zabiegu perforacji, które zapewni maksymalną sprawność przyływu medium złożowego do otworu, lub też jego chłonność.
- Większość danych eksperymentalnych sugeruje, że do skutecznego zminimalizowania lub usunięcia uszkodzenia perforacyjnego i wprowadzonego w trakcie wiercenia i udostępniania horyzontu, konieczne są podciśnienia większe od powszechnie stosowanych w przeszłości, powiązane z szeregiem parametrów złożowych i konstrukcyjnych otworu i perforatora, a w szczególności z przepuszczalnością skały złożowej.
- Z przedstawionych wyników badań wynika, że w kolektorach typu węglanowego nie stwierdzono korelacji wartości podciśnienia zastosowanego w trakcie perforacji, z uzyskanym wskaźnikiem sprawności przyływu do otworu. W takich kolektorach bardziej zasadne jest stosowanie metody perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu, ewentualnie z zastosowaniem cieczy kwasującej i przenoszącej podsadzkę w strefie zabiegu, celem wykonania jednoczesnego wstępnego szczelinowania wraz z perforacją.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

Literatura

- [1] Allen T.O., Worcel H.C.: *Productivity Method of Evaluating Gun Perforation*. API Southwest District Meeting, marzec 1956.
- [2] Bartusiak R., Halleck P.M., Behrmann L.A.: *Experiments Investigate Underbalance Flow Velocity and Volume Needed to Obtain Perforation Cleanup*. JPSE, vol. 17, s. 19-28, 1997.
- [3] Behrmann L.A.: *Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage*. SPE 30081, wrzesień 1996.
- [4] Behrmann L.A., McDonald B.: *Underbalance or Extreme Overbalance*. SPE 57390, kwiecień 1999.
- [5] Bell W.T., Golina T.G., Ellis R.C., Moseley P.E.: *Predicting downhole shaped charge gun Performance – viability of Method*. SPE 60129, 1999.
- [6] Folse K., Allin M. i in.: *Perforating System Selection for Optimum Well Inflow performance*. SPE 73762, 2002.
- [7] Habera Ł.: *Perforacja otworów wiertniczych jako czynnik wpływający na wielkość skin-efektu*. Praca 1162/STS, Instytut Nafty i Gazu 2008.
- [8] Halleck P.M., Poyol E., Santarelli F.J.: *Estimating Perforation Flow Performance From Variation in Indentation Hardness*. SPE Drilling and Completion, 271, grudzień 1995.
- [9] Halleck P.M.: *Recent Advances in Understanding Perforator Penetration and Flow Performance*. SPE 27981-PA, 1997.
- [10] Halleck P.M., Karacan C.O.: *Changes in Perforation-Induced Formation Damage with Degree of Underbalance: Comparison of Sandstone and Limestone Formations*. SPE 86541, luty 2004.
- [11] Handren P.J. i in.: *Overbalance Perforating and Stimulation Method for Wells*. SPE 26515, 1993.
- [12] King G.E., Anderson A., Bingham M.: *A Field Study of Underbalance Pressures Necessary to Obtain Clean Perforations Using Tubing Conveyed Perforating*. J. Pet. Tech. 38(7), s. 662-664, czerwiec 1986.
- [13] Krueger R.F.: *Joint Bullet and Jet Perforation Tests*. API Pacific Coast District Meeting, maj 1956.
- [14] Pratt D.W., Carrera V.: *Performance Patterns for Perforating Charges Optimized in Hard and Soft Materials*. SPE 52203, 1999.
- [15] Pucknell J.K., Behrmann L.A.: *An investigation of the Damaged Zone Created by Perforating*. SPE 22811, 1991.
- [16] Pucknell J.K., Behrmann L.A.: *An Investigation of the Damaged Zone Created during Perforating*. SPE 22811, 1991.
- [17] *Recommended Practices for Evaluation of Well Perforators*, API RP 19B, 1st Edition, listopad 2000.
- [18] Schatz J.F. i in.: *High-Speed Downhole Memory Recorder and Software Used to Design and Confirm Perforating/Propellant Behavior and Formation Fracturing*. SPE 56434, 1999.
- [19] Tariq S.M.: *New, Generalized Criteria for Determining the Level of Underbalance for Obtaining Clean perforations*. SPE 20636, wrzesień 1990.



Mgr inż. Antoni FRODYMA – absolwent Wydziału Wiertniczo-Naftowego AGH w Krakowie. Kierownik Zakładu Techniki Strzelniczej INiG. Zajmuje się konstruowaniem sprzętu strzałowego i technologii jego stosowania w otworach wiertniczych. Współautor kilku patentów i wzorów użytkowych.