

Antoni Frodyma
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Intensywne udostępnianie złóż węglowodorów techniką perforacyjną

Część I: Uszkodzenie perforacyjne strefy przyotworowej

Wprowadzenie

Celem perforacji jest osiągnięcie maksymalnej produktywności otworu w opłacalny sposób oraz ustanowienie dobrego połączenia pomiędzy otworem wiertniczym a formacją złożową. Czasami jednak perforacja przy podciśnieniu nie pozwala osiągnąć spodziewanej produktywności odwiertu, z powodu występowania wokół kanału perforacyjnego rejonu o ograniczonej przepuszczalności.

Perforacja wiąże się z odpaleniem ładunku wybuchowego, który rozpędza metalowe cząsteczki wkładki kumulacyjnej – w postaci strugi, przebijającej rury okładzinowe, cement i szkielet skalny przy ekstremalnie wielkich prędkościach (~7000 m/s). Fala uderzeniowa o wysokiej amplitudzie rozchodzi się wokół nowo utworzonego kanału, a jej impulsywne działanie rozbija ziarna skalne oraz spoiwo. Fala uderzeniowa zmniejsza wytrzymałość mechaniczną skały i w sąsiedztwie kanału perforacyjnego generuje drobne cząsteczki (ze spękanych ziaren). Podczas perforacji prowadzonej przy podciśnieniu, gwałtowny, wsteczny przepływ płynu oczyszcza kanał perforacyjny – powodując usunięcie osłabionej skały i szczątków wkładki kumulacyjnej. Ten krótkotrwały, gwałtowny przepływ kontroluje oczyszczanie kanału perforacyjnego i jego średnicę [1].

Uszkodzenie perforacyjne

W trakcie perforacji wykonywanej przy podciśnieniu, chwilowy, gwałtowny przepływ ze zbiornika do perforacji powoduje powstanie w pobliżu ścianek kanału bardzo wysokiego gradientu ciśnienia. Siła wleczenia wywierana

na ścianki kanału w trakcie tego przepływu przewyższa osłabione siły kohezji pomiędzy spękanymi ziarnami skalnymi i wypłukuje je ze szkieletu skalnego, oczyszczając i powiększając kanał perforacyjny. Usuwanie osłabionej skały może występować poprzez erozję ziaren skalnych lub na skutek niszczenia, poprzez rozciąganie albo ścinanie szkieletu skalnego wokół kanału [13]. Skutkiem ubocznym gwałtownego przepływu jest migracja drobnych cząsteczek (pierwotnie niezakłócających tego przepływu) do kanału perforacyjnego. Cząsteczki natywne i cząsteczki utworzone w trakcie propagacji fali uderzeniowej migrują w czasie chwilowego, gwałtownego przepływu – gromadząc się wokół kanału perforacyjnego, zatykając kanaliki porowe i pogarszając w ten sposób przepuszczalność. Ten obszar o wysokim stężeniu drobnych cząstek jest znany jako „strefa zbita” lub „skruszona” i stanowi podstawowe źródło uszkodzenia perforacyjnego. Innym źródłem uszkodzenia są szczątki reszkowe, nieusunięte z kanału perforacyjnego.

Pomiary laboratoryjne [7, 10] lokalnego rozkładu przepuszczalności z wykorzystaniem przepuszczalnościomierza promieniowego sugerują, że nie zawsze uszkodzenie wokół kanału perforacyjnego występuje w sąsiedztwie jego ścianek. W szczególności wyraźne jest to wówczas, gdy zastosowane podciśnienie nie jest wystarczająco wysokie, a przepuszczalność perforowanych utworów niska. Stwierdzono, że grubość strefy skruszonej w rdzeniach z piaskowca Berea leży w granicach 8÷25 mm. Grubość ta jest niejednorodna – przy czole otworu jest większa niż w wierzchołku kanału perforacyjnego. Zaobserwowano

również, że grubość strefy skruszonej zwiększa się wraz ze wzrostem naważki materiału wybuchowego ładunku kumulacyjnego. Wykazano, że w trakcie perforacji wytrzymałość na rozciąganie słabych piaskowców może być 5-6-krotnie niższa wokół ścianek kanału. Ostatnio wykazano również [7], że rozkład drobnych cząsteczek wokół kanału perforacyjnego jest funkcją wielkości podciśnienia. Na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych opracowano wiele empirycznych korelacji, pozwalających określać optymalne wartości podciśnienia wymaganego do perforacji prowadzonej przy podciśnieniu.

W celu określenia optymalnych warunków roboczych, podstawowe znaczenie ma zrozumienie charakteru ograniczenia przepuszczalności i mechanizmów niszczenia skały wokół kanału perforacyjnego. Do realizacji tego zadania opracowano model [4], wykazujący dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi i obserwacjami terenowymi, w zakresie rozkładu drobnych cząsteczek oraz pogorszenia przepuszczalności wokół kanału perforacyjnego.

Badanie strefy uszkodzonej, powstałej w wyniku perforacji

W badaniach realizowanych w symulowanych warunkach otworowych [13] wykonano perforację 59 rdzeni, obejmujących próbki z 6 różnych piaskowców, spośród których 3 pochodziły z pól produkcyjnych, a pozostałe 3 – z wychodni powierzchniowych (Berea, Gold i Castlegate). Dla każdego z rdzeni uzyskano kilka skanów przekrojów. Przed perforowaniem rdzenie te zostały nasycone próżniowo solanką, wypartą następnie naftą. Perforacje wykonywano ładunkami o naważkach materiału wybuchowego wynoszących: 3,2; 6,5 lub 22 g, w odtwarzanych warunkach głębokich ciśnień i naprężeń górotworu (w niektórych przypadkach także z zachowaniem temperatury głębokiej). Większość perforacji wykonano przy podciśnieniu, a część z nich – w warunkach równowagi ciśnień. Wszystkie rdzenie po perforacji poddano testom przepływu.

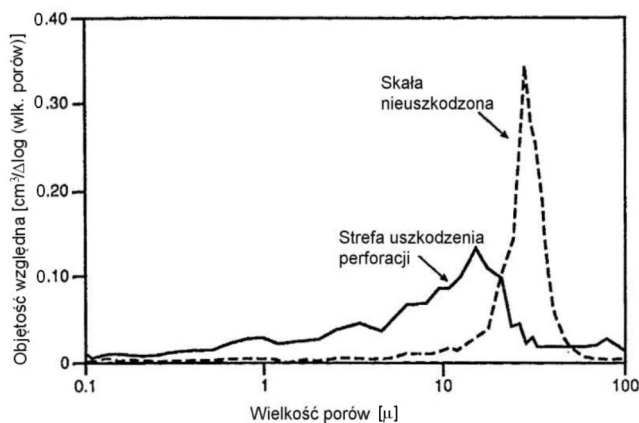
Na podstawie obrazów tomograficznych perforowanych rdzeni dokonano spostrzeżenia, że gęstość skały w pobliżu kanału perforacyjnego jest bardzo podobna do gęstości w innych jej częściach (na większą gęstość mógłby wskazywać jaśniejszy odcień szarości w pobliżu kanału perforacyjnego – co jednak nie zostało stwierdzone w żadnym spośród badanych skanów tomograficznych). Maksymalny wzrost gęstości w pobliżu perforacji mieścił się w zakresie do 5%, pozostając w występujących naturalnie granicach zmienności tego parametru. Brak zmiany gęstości oznacza, że porowatość również nie uległa zmianie oraz że skała nie jest w żadnym sensie „zbita” (jak to niekiedy bywa określane).

Porozymetria rtęciowa

Brak jakiegokolwiek wzrostu gęstości wokół kanałów perforacyjnych był zaskakujący, zatem w celu sprawdzenia wyników dostarczonych przez rentgenowskie skanowanie tomograficzne przeprowadzono porozymetrię rtęciową. Badanie to polega na zatłaczaniu rtęci do opróżnionej próbki skalnej, dzięki czemu – na podstawie całkowitej objętości zatłoczonej rtęci – uzyskuje się porowatość. Dodatkowo, analizując objętości rtęci zatłaczane przy różnych ciśnieniach można wnioskować o rozkładzie wielkości porów, a na tej podstawie – zgrubnie oszacować przepuszczalność.

Do badań zastosowano małe próbki (o objętości około 1 cm³). W celu zminimalizowania wpływu występujących naturalnie zmian przepuszczalności, każdą próbkę pobraną z boku kanału perforacyjnego zestawiano w parze z nieuszkodzonym fragmentem skalnym z pobliskiego obrzeża rdzenia. Pary próbek wybierano w ten sposób, aby leżały one w tej samej płaszczyźnie uławicenia. Przebadano tak 9 różnych perforowanych rdzeni.

Rysunek 1 przedstawia porównanie typowego rozkładu wielkości porów w otoczeniu kanału perforacyjnego, w porównaniu z takim rozkładem dla skały nieuszkodzonej. Jasne jest, iż mimo tego, że porowatość została zachowana, rozkład wielkości porów uległ znacznej zmianie – duże pory zostały zniszczone i zastąpione przez zwiększoną ilość porów małych.

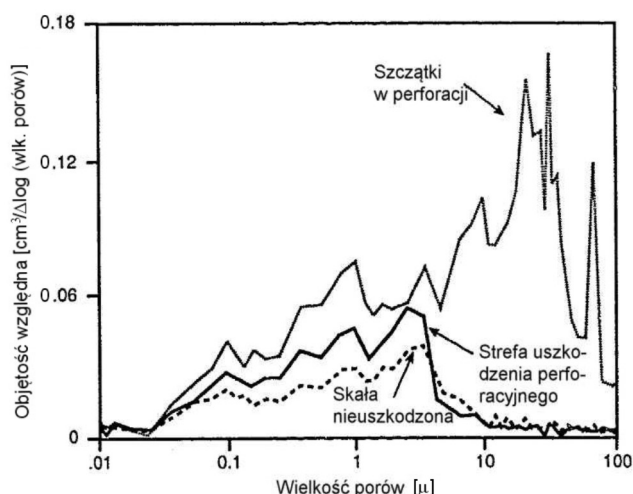


Rys. 1. Porównanie rozkładu wielkości porów: skały sąsiadującej z kanałem perforacyjnym oraz materiału nieuszkodzonego, dla rdzenia B3, sperfiorowanego ładunkiem o naważce 22 g MW [13]

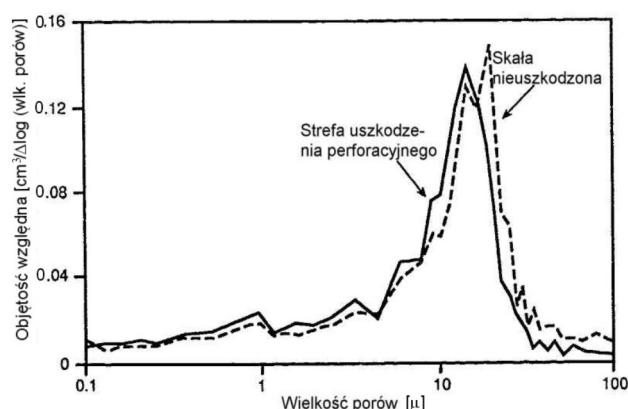
Rysunek 2 przedstawia rozkład wielkości porów dla skały typu A, w której w kanale perforacyjnym pozostały szczątki z tego zabiegu – skała A ma niską przepuszczalność (około 1 mD), a zastosowane podciśnienie o wielkości 500 psi (3,45 MPa) było wyraźnie niewystarczające do ich usunięcia. Jak wynika z rysunku 2, szczątki te były bardzo

porowate, a ich przepuszczalność była znacznie większa niż skały nieuszkodzonej. Rozkład wielkości porów dla strefy uszkodzonej jest podobny jak w przypadku strefy nieuszkodzonej, choć ilość porów uległa zwiększeniu.

Wszystkie te próby zostały przeprowadzone z użyciem ładunków kierunkowych o naważce 22 g MW, natomiast w przypadku badań wykonanych z zastosowaniem ładunków o naważce 6,5 g MW obserwuje się jedynie nieznaczną zmianę rozkładu wielkości porów, co ilustruje rysunek 3.



Rys. 2. Porównanie rozkładu wielkości porów: dla nieuszkodzonej skały, strefy uszkodzenia perforacyjnego oraz szczątków pozostałych w rdzeniu A2, sperforowanym ładunkiem o naważce 22 g MW [13]



Rys. 3. Porównanie rozkładu wielkości porów dla skały wewnątrz i na zewnątrz strefy uszkodzenia perforacyjnego, dla rdzenia perforowanego ładunkiem o naważce 6,5 g MW (rdzeń Berea BP13) [13]

Badanie przepływu promieniowego przepuszczalnościomierzem

Aby uzyskać definitywną miarę przepuszczalności strefy skruszonej (zmiażdżonej) zbudowano przepuszczalnościomierz przepływu promieniowego, w którym można mierzyć rozkład ciśnienia w poprzek rdzenia, co zapewnia

jednoznaczny pomiar przepuszczalności. Technika ta skutecznie uśrednia efekt niejednorodności małej skali, obserwowany w pomiarze miniprzepuszczalnościomierzem.

Wstępne wyniki uzyskane z pomiaru przepuszczalnościomierzem w przepływie promieniowym sugerują, że zmniejszenie przepuszczalności w strefie uszkodzenia perforacyjnego może wykraczać poza średnicę strefy skruszonej. W niektórych przypadkach istnieją również pewne dowody występowania cienkiego rejonu o wysokiej przepuszczalności w pobliżu kanału perforacyjnego – prawdopodobnie są to szczątki o wyższej porowatości, które nie zostały wypłukane z perforacji.

Mechanizm powstawania strefy uszkodzenia perforacyjnego

Zazwyczaj perforacje tworzy się za pomocą ładunków kierunkowych. Wytwarzają one strugę cząstek metalicznych o wysokiej prędkości, która „przebija” otwór (oddziałując wielkim ciśnieniem) przez rury okładzinowe, cement i skałę. Otwór jest tworzony poprzez wytłaczanie na zewnątrz skały, leżącej na drodze strugi kumulacyjnej.

W procesie detonacji ładunku kierunkowego, w czubku strugi wytwarzana jest fala uderzeniowa, która rozchodzi się promieniowo na zewnątrz. W pobliżu kanału perforacyjnego ciśnienie tworzone przez tę falę są więcej niż wystarczające aby spowodować pęknięcie skały. Wytwarza to typową materię skalną, związaną ze strefą uszkodzenia perforacyjnego (skruszone ziarna, itp.). Jako że fala ta rozchodzi się promieniowo, ciśnienie przez nią wytwarzane maleje, gdyż fala rozprzestrzenia się na dużym obszarze; ten spadek ciśnienia jest również efektem strat energii powodowanych przez „kruszenie” skały.

Prędkość z jaką powstaje perforacja jest tak duża, że skała nie ma czasu na odkształcanie się w postaci widocznych szczelin. Zamiast tego, przemieszczanie się skały osiągane jest przez tworzenie wielkiej ilości mikroszczelin, rozszerzających się poprzez ziarna piasku i pomiędzy nimi. W pobliżu czubka strugi kumulacyjnej szybkość narastania perforacji maleje – niekiedy umożliwiając wzrost większych szczelin, biegnących od czubka perforacji.

Z powodu wypychania strefy skruszonej na zewnątrz, w celu utworzenia miejsca dla kanału perforacyjnego jest on otoczony przez strefę sprężystą, w której działające promieniowo siły próbują go zaciskać. Zjawisko to określane jest jako „klatka naprężeń” [Warpinski, 06.1983, „Investigation of the accuracy and reliability of in situ stress measurements using hydraulic fractures in perforated cased holes”, 24. Sympozjum mechaniki skał, USA]. Jeżeli naprężenia nadkładu nie są zbyt wysokie to mogą

również występować siły rozciągające, działające stycznie w strefie sprężystej na granicy strefy skruszonej. Może to prowadzić do szczelinowania promieniowego.

Jeżeli skała jest dostatecznie słaba, wówczas po perforacji naprężenia nadkładu spowodują zaciskanie się przestrzeni powstałej w wyniku tej perforacji – prowadząc do problemów z sypaniem piasku. Jeżeli skała jest silniejsza to może pozostać niezaburzona, ale części strefy skruszonej mogą ulec zapadnięciu, ponieważ będą osłabione. Jeżeli szczątki utworzone przez zapadanie się strefy skruszonej zostaną wypłukane, spowoduje to powiększenie wejścia do kanału perforacyjnego. W niektórych przypadkach trudno jest usunąć szczątki utworzone przez zapadnięcie się strefy skruszonej, co prowadzi do utraty produktywności z perforacji. Obserwowane w pobliżu kanału perforacyjnego spiralne szczeliny są niekiedy uważane za skutek częściowego zapadania się osłabionych ścianek kanału perforacyjnego.

Przyczyny braku zmiany gęstości

Badanie metodą cienkich przekrojów oraz porozymetria rtęciowa wykazują, że w obrębie strefy uszkodzenia perforacyjnego struktura porowa skały zostaje zaburzona – duże pory ulegają zniszczeniu w wyniku mikroszczelinowania lub są wypełniane skruszonymi kawałkami ziaren (w szczególności w pobliżu kanału perforacyjnego). Nie zachodzi zmiana porowatości ani gęstości, ponieważ duże pory są zastępowane objętością utworzoną w wyniku mikroszczelinowania.

Z uwagi na prędkość z jaką tworzona jest strefa skruszona, nie powinien dziwić fakt, że nie zachodzi zmiana porowatości. Strefa skruszona jest formowana przy prędkości większej niż prędkość dźwięku w cieczy, dzięki czemu nie ma czasu, aby ciecz zawarta w przestrzeni porowej mogła być wypchnięta z kanału perforacyjnego. Ciecz jest również względnie nieściśliwa, dlatego gdy znajduje się ona w przestrzeni porowej to nie może być wypchnięta z porów ani ściśnięta – w efekcie tego, objętość porowa jaką zajmuje ciecz musi zostać zachowana. Inny wynik można uzyskać jeżeli przestrzeń porowa zawiera gaz, który charakteryzuje się znacznie większą ściśliwością.

Mechanizm zmniejszenia przepuszczalności

Z porozymetrii rtęciowej jasno wynika, że duże pory są niszczone przez mikroszczelinowanie i zastępowane przez mniejsze pory – co uważa się za główną przyczynę ograniczenia przepuszczalności w strefie uszkodzenia perforacyjnego.

Występują dwa podstawowe źródła drobnych cząstek wokół kanału perforacyjnego:

- cząstki generowane wskutek kruszenia ziaren,
- występujące w szkielecie skalnym cząstki natywne.

Oddziaływanie bardzo szybkiej końcówki strugi kumulacyjnej na szkielet skalny powoduje powstawanie fali uderzeniowej, która rozbija pobliskie ziarna i generuje drobne cząsteczki. W wyniku kruszenia ziaren i rozrywania materiału spoiwa, wytrzymałość na rozciąganie skały otaczającej strugę kumulacyjną maleje. Jeżeli w trakcie perforacji zostanie zastosowane podciśnienie, fala podciśnieniowa rozprzestrzeni się przez medium płynne, powodując zwrotny przepływ płynu ze zbiornika – w kierunku do kanału perforacyjnego.

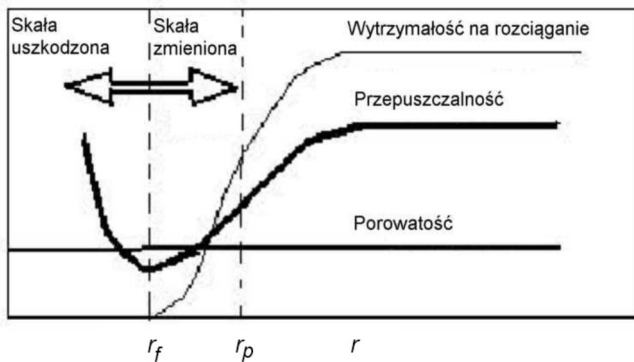
Jak dobrze wiadomo, szybki przepływ płynu przez skały powoduje mechaniczne porywanie drobnych ich cząstek lub iłów. Cząstki te są następnie zawieszane w strumieniu przepływu, przenoszone przez płyn w kierunku do kanału perforacyjnego i wychwytywane w kanalikach porowych. Halleck et al. [8] badali cienkie przekroje próbek wokół kanału perforacyjnego przed oraz po perforacji i stwierdzili, że gęstość drobnych cząsteczek wokół kanału perforacyjnego jest znacznie większa niż w skale rodzimej. Ogólne stężenie cząsteczek wokół kanału perforacyjnego zwiększa się na skutek występowania drobin powstających z rozbijanych ziaren skalnych i cząsteczek rodzimych, mobilizowanych przez gwałtowny przepływ. Cząsteczki te zatykają kanaliki porowe, a tym samym poważnie pogarszają przepuszczalność.

Mechanizm powstawania uszkodzenia wokół kanału perforacyjnego

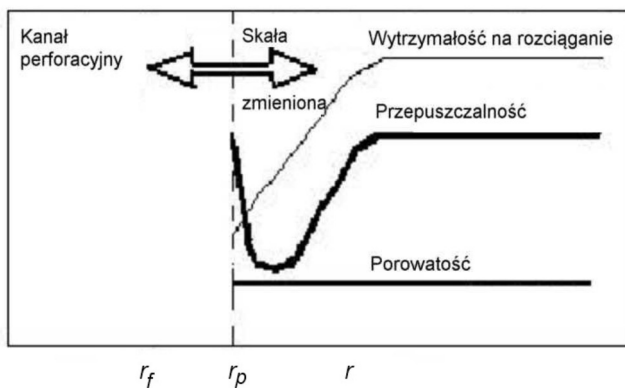
Na podstawie cytowanych badań doświadczalnych wyłania się pewien obraz jakościowy udostępnienia perforacyjnego. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono trendy jakościowe właściwości skały, jako funkcję odległości od kanału perforacyjnego. Rysunek 4 przedstawia właściwości skały w zależności od odległości od wkładki, przed gwałtownym przepływem zwrotnym. Bezpośrednio wokół ścianki kanału perforacyjnego znajduje się rejon uszkodzonej skały, w którym jej wytrzymałość na rozciąganie jest niewielka. Dane doświadczalne [16] sugerują, że przepuszczalność w tym rejonie może być znaczna, z uwagi na występowanie szczelin. Zasadniczo niezmienna w trakcie tego wstępnego okresu propagacji fali uderzeniowej pozostaje porowatość skały.

Rysunek 5 przedstawia schemat kanału perforacyjnego utworzonego bezpośrednio po gwałtownym przepływie zwrotnym.

W wyniku ekstremalnie dużych gradientów ciśnienia oraz prędkości przepływu wokół kanału perforacyjnego, w trak-



Rys. 4. Schemat właściwości skały wokół kanału perforacyjnego przed gwałtownym przepływem zwrotnym
Oznaczenia: r_f – promień strefy uszkodzonej, r_p – promień kanału perforacyjnego [4]



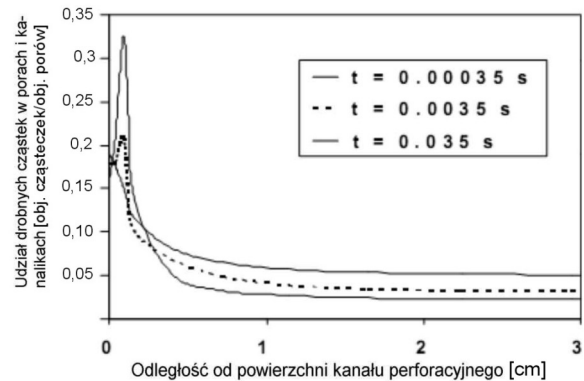
Rys. 5. Schemat właściwości skały wokół kanału perforacyjnego po gwałtownym przepływie zwrotnym (oznaczenia jak na rysunku 4) [4]

cie chwilowego, gwałtownego przepływu następuje rozpad skały aż do pewnego promienia r_p , powodując utworzenie kanału perforacyjnego. Średnica kanału perforacyjnego jest zależna od wielkości podciśnienia i wytrzymałości na rozciąganie osłabionej skały. Na skutek dużych prędkości przepływu następuje również mobilizacja drobnych cząstek bezpośrednio wokół kanału perforacyjnego. Cząsteczki te mogą się tworzyć i gromadzić w rejonie otaczającym kanał perforacyjny, tj. w strefie zagęszczonej. Przepuszczalność w tej strefie może być znacznie niższa niż przepuszczalność zbiornika, na skutek skruszenia ziaren skalnych i nagromadzenia drobin pochodzących ze zbiornika. Aby poprawić produktywność perforowanych kanałów niezbędna jest maksymalizacja przepuszczalności tej zagęszczonej strefy i aby to osiągnąć należy zastosować optymalne podciśnienie.

Wyniki obliczeń modelowych

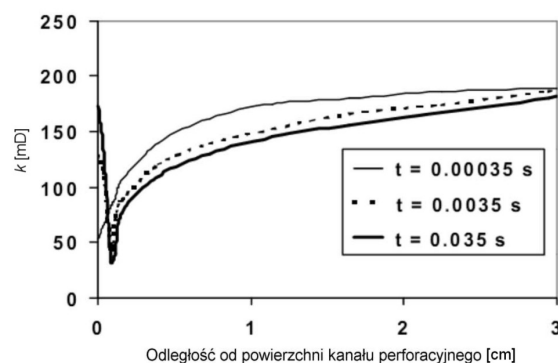
Całkowite stężenie drobnych cząstek wzrasta, a następnie maleje – wraz ze wzrostem odległości od ścianek kanału perforacyjnego. Takie zachowanie jest

spójne z obserwacjami doświadczalnymi poczynionymi przez Halleck i in. [8]. Cząsteczki leżące bardzo blisko kanału perforacyjnego są wynoszone przez przepływający płyn i gromadzą się w pewnej odległości od ścianek tego kanału (rysunek 6).



Rys. 6. Całkowite stężenie zatrzymanych cząstek (ciała porów + kanaliki porowe) w trakcie gwałtownego przepływu zwrotnego [4]

Z uwagi na dużą prędkość generowania drobnych cząstek z ciał porowych w trakcie wczesnego etapu gwałtownego napływu, szybkość zatykania kanalików porowych również jest duża. Zmniejszenie przepuszczalności wokół kanału perforacyjnego jest zależne od tej równowagi generowania drobnych cząstek oraz ich wychwytywania. Z upływem czasu zawartość drobnych cząstek w ciałach porowych maleje, a w kanalikach porowych wzrasta. Obserwowane są względnie małe zmiany porowatości, natomiast przepuszczalność zmniejsza się w istotnym zakresie, ponieważ drobne cząstki są przenoszone z ciał porów do kanalików porowych – jak pokazano to na rysunku 7.

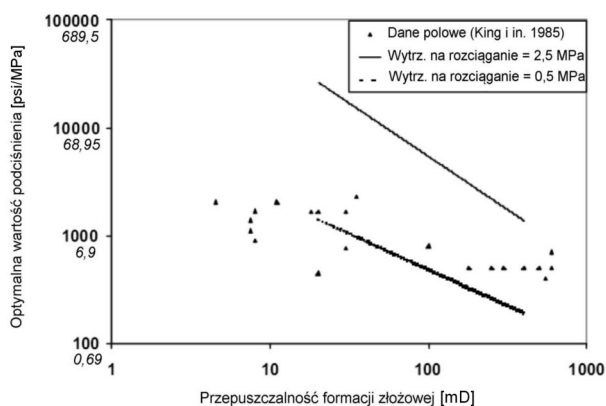


Rys. 7. Przepuszczalność lokalna w trakcie gwałtownego przepływu zwrotnego [4]

Wpływ właściwości mechanicznych formacji skalnej

Rysunek 8 przedstawia wpływ wytrzymałości skały na rozciąganie przy optymalnej wartości podciśnienia.

W symulacjach tych zależność zmienności wytrzymałości na rozciąganie od odległości od ścianek kanału perforacyjnego jest ignorowana. Wraz ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie grubość strefy skruszonej wzrasta – dlatego też w przypadku wytrzymałej skały, do wytworzenia czystego kanału perforacyjnego i minimalizacji rozmiarów strefy skruszonej wymagane są duże wartości podciśnienia.



Rys. 8. Optymalna wartość podciśnienia w funkcji przepuszczalności formacji skalnej [1]

Odwołując się do rysunku 8 można stwierdzić, że w przypadku skał złożowych o niższej przepuszczalności, wielkości optymalnego podciśnienia wymaganego do uzyskania najlepszego wyniku zabiegu stają się bardzo duże – np. dla skały o przepuszczalności ok. 20 mD (co jest jeszcze dosyć dobrą przepuszczalnością) i wytrzymałości na rozciąganie równej 0,5 MPa wymagane podciśnienie wynosi już około 12 MPa, natomiast w przypadku skały o wytrzymałości na rozciąganie równej 2,5 MPa wartość ta rośnie aż do 100 MPa. Takie podciśnienia nie mogą być stosowane, ponieważ przekraczają wytrzymałość konstrukcji otworu i grożą jego zgnieciem. Patrząc natomiast na zagadnienie od strony złoża, w celu uzyskania w otworze podciśnienia o wielkości np. 20 MPa, przy całkowitym opróżnieniu odwiertu musimy dysponować ciśnieniem złożowym o wartości 20 MPa – co również nie zawsze będzie możliwe (zwłaszcza w przypadku otworów starszych i wyeksploatowanych). Jako rozwiązanie tego problemu zaproponowano technologię perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu, jako pewnego rodzaju odwrócenie typowo stosowanej perforacji przy podciśnieniu w otworze.

Podsumowanie

1. W artykule przedstawiono przegląd teorii wyjaśniających przyczyny tworzenia się strefy uszkodzenia perforacyjnego wokół kanałów perforacyjnych, powstających w trakcie udostępniania horyzontów produktywnych ładunkami kierunkowymi. Na tej podstawie, dokonując wyboru metody planowanego udostępnienia horyzontu produktywnego można wnioskować o wykonanie perforacji przy ekstremalnym nadciśnieniu.
2. Przedstawiono model powstawania uszkodzenia perforacyjnego oraz wyniki wykonanych na jego podstawie

obliczeń, pozwalających zarówno na prezentację rozkładu zmian porowatości i przepuszczalności wokół ścianek kanału perforacyjnego, jak również na krótką dyskusję na temat wartości optymalnych podciśnień, jakie wymagane są dla skutecznego oczyszczania kanału perforacyjnego podczas nagłego napływu do otworu. Pokazano, że mogą zaistnieć sytuacje, gdy ciśnienia takiego nie można uzyskać – co jest szczególnym wskazaniem dla zastosowania perforacji w technologii ekstremalnego nadciśnienia.

Artykuł nadesłano do Redakcji 4.03.2011 r. Przyjęto do druku 8.03.2011 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 Journal, 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 podczas 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 podczas 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 podczas Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado 6–9.10.1996.
- [12] Mehdi Azari, Burlison John 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*. Journal of Colloidal and Interface Science, vol. 149, no. 1, 1.03.1992.
- [15] Snider P.M., Hall F.R., Whisonant R.J.: *Experiences with high energy stimulations for enhancing near-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 podczas 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 podczas 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.

ZAKŁAD TECHNIKI STRZELNICZEJ

- konstrukcja urządzeń strzelniczych przeznaczonych do udostępniania poziomów ropo- i gazonośnych;
- opracowywanie technologii i metod prowadzenia prac udostępniających przy wykorzystaniu własnych rozwiązań konstrukcyjnych sprzętu strzelniczego;
- konstrukcja urządzeń strzelniczych przeznaczonych do prac specjalnych i ratunkowych w otworach wiertniczych (korki detonacyjne, ładunki o działaniu pionowym, obcinacze rur okładzinowych i płuczkowych);
- przywracanie cyrkulacji w odwiercie – uwalnianie przewodu wiertniczego;
- intensyfikacja oraz stymulacja przepływów medium do odwiertu (szczelinowanie strefy przyotworowej złoża prochowymi generatorami ciśnienia);
- badania atestacyjno-wytrzymałościowe sprzętu strzałowego;
- małoseryjna produkcja urządzeń strzelniczych (perforatory, korki detonacyjne, obcinacze do rur).

Kierownik: mgr inż. Antoni Frodyma

Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków

Tel: 12 653-25-12 w. 171

Faks: 12 653-16-65

E-mail: antoni.frodyma@inig.pl

