

# Zasady oddziaływań fizycznych paliw stałych w środowisku otworu wiertniczego i skał złożonych i ich implikacje dla prac stymulacyjnych

## *The principles of propellants physical interactions in borehole and reservoir rocks environment and their implications for stimulation jobs*

***Antoni Frodyma, Łukasz Habera***

*Instytut Nafty i Gazu w Krakowie, ul. Lubicz 25a, 31-533 Kraków, PL*

*Autor do korespondencji: frodyma@inig.pl*

***Streszczenie:*** Referat przedstawia ogólne podstawy fizyczne wykorzystania paliw stałych (propelantów) w charakterze środków intensyfikacji/stymulacji wydobywania albo poprawy chłonności odwiertów na złożach konwencjonalnych lub jako narzędzia „pierwszego podejścia” dla głównych operacji szczelinowania na złożach niekonwencjonalnych.

Omawia się w nim te aspekty charakterystyki skał zbiornikowych, które uzasadniają zastosowanie paliw stałych i roszą szanse powodzenia zabiegu, jak również takie, które czynią taki zabieg niecelowym, oraz formy realizacyjne urządzeń wykorzystujących propelanty do wykonywania zabiegów w otworach, wśród nich rozwiązania zagraniczne, z uwypukleniem możliwości krajowych posiadanych w tym zakresie.

Podkreślone jest praktycznie zerowe obciążenie środowiska związane z wykonywaniem prac na otworach z użyciem paliw stałych, jak również możliwości istotnego ograniczenia tego obciążenia przy szczelinowaniu hydraulicznym poprzedzanym zabiegiem z ich zastosowaniem.

***Abstract:*** The work presents general physical principles of propellants use in capacity of intensification/stimulation means for increase of production or injection performance of boreholes on conventional fields as well as “first approach” tools for main hydraulic fracturing operations on unconventional reservoirs.

It discusses aspects of reservoir rocks characteristics that justify use of propellants with a good chance of the job success, as well as those that render their use purposeless, and also implementation forms of the tools that use propellants for jobs in boreholes, among them some foreign solutions with emphasis on domestic capacities in this scope.

Practically null environment burden connected with execution of jobs in boreholes with propellants, and also possibilities of significant decreasing such burden by massive hydraulic fracturing operations when preceded with their use is also stressed.

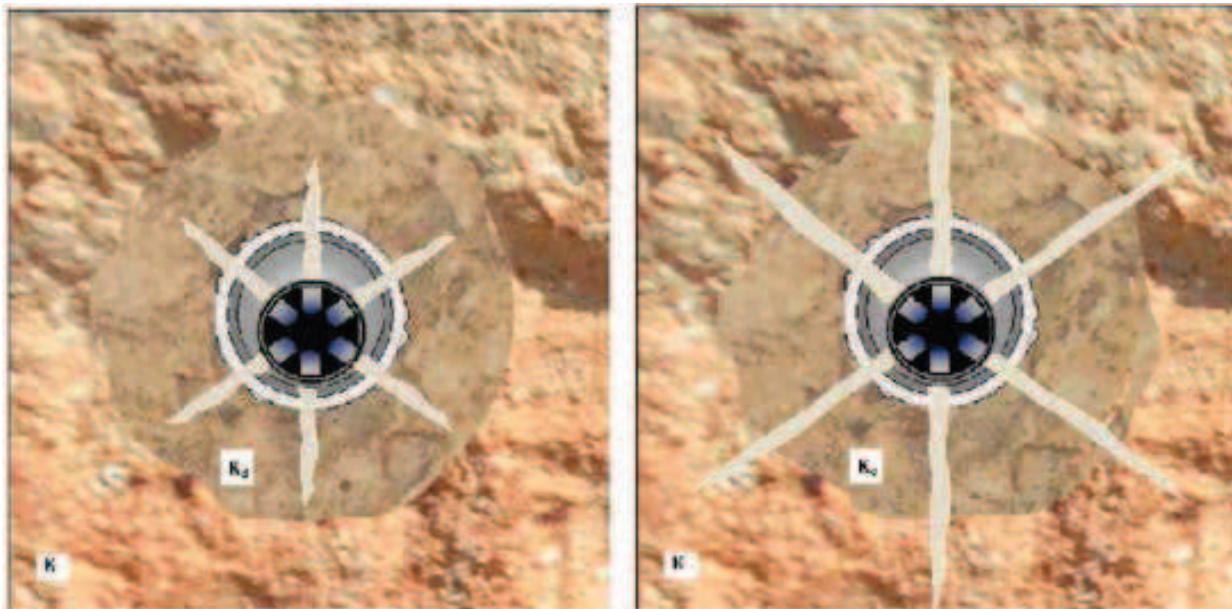
***Słowa kluczowe:*** propelanty, oddziaływania fizyczne, otwór wiertniczy, stymulacja, szczelinowanie

***Keywords:*** propellants, physical influences, borehole, stimulation, fracturing

## 1. Wprowadzenie

Zadaniem otworu wiertniczego jest utworzenie połączenia hydraulicznego otworu ze złożem i utrzymanie go przez cały czas jego technicznej żywotności w dobrym stanie. W procesie wiercenia i udostępniania otworów wydobywczych ropnych i gazowych zachodzi jednak zanieczyszczenie przyotworowej strefy złoża komponentami roztworów wiertniczych i cementacyjnych, wytrąceniami soli, substancjami asfaltowo – smołowymi i innymi cząstkami stałymi, powodujące pogorszenie pierwotnych właściwości filtracyjnych skał złożowych i zmniejszenie potencjalnych i bieżących wydatków otworów. Dalsze uszkodzenia przepuszczalności

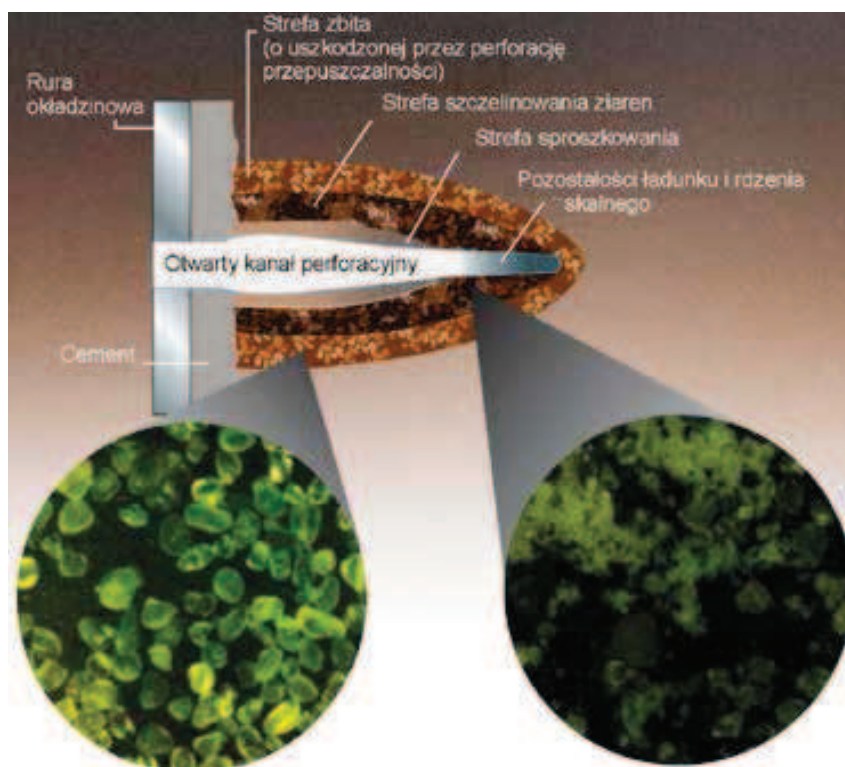
skały są wprowadzane w toku zabiegu perforacji wokół ścianek kanału perforacyjnego, na skutek przekraczania wytrzymałości skały, tła skalnego i ziaren budulcowych skały przez ciśnienia wytwarzane oddziaływaniem strugi kumulacyjnej.



**Rys. 1.** Nieprawidłowe (lewa strona) i prawidłowe udostępnienie skały nieuszkodzonej przez perforację [2]

### 1.1. Uszkodzenie przepuszczalności wprowadzane przez perforację

Uszkodzenie przepuszczalności które można przypisać gwałtownemu działaniu strugi kumulacyjnej można podzielić na kilka stref, zilustrowanych poniżej (rys. 2).



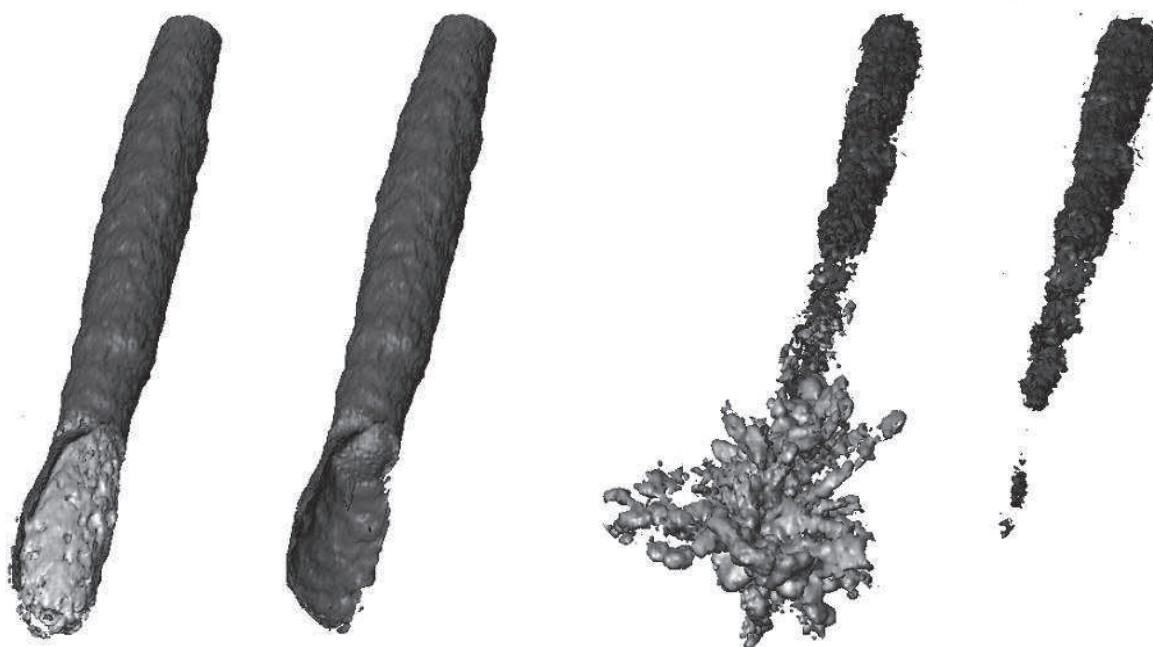
**Rys. 2.** Strefy różnego uszkodzenia przepuszczalności wokół kanału perforacyjnego powodowane oddziaływaniem strugi kumulacyjnej [6]

Jak widać na rysunku 2, idąc od osi kanału perforacyjnego występuje strefa sproszkowana, w której na skutek znacznego przekroczenia wytrzymałości ziaren we wszystkich kierunkach (ciśnienie w wierzchołku strugi kumulacyjnej może sięgać 100 GPa!) nastąpiło całkowite zniszczenie struktury ziaren. Dalej w kolejności występuje strefa szczelinowania ziaren – w której zostały przekroczone wytrzymałości w głównych kierunkach naprężeń i następuje pękanie ziaren.

Strefę tą otacza kolejna – strefa zbita, w której nastąpiło uszkodzenie pierwotnej struktury mechanicznej skały, ale bez uszkodzania jej ziaren.

Według niektórych badań, stopień uszkodzenia przepuszczalności w strefie zmiażdżonej wokół kanału perforacyjnego może sięgać od 40 % do nawet 100 % przepuszczalności pierwotnej.

Natomiast posuwając się wzdłużnie po osi kanału perforacyjnego, w jego wierzchołku natkniemy się przeważnie na pozostałości z wkładki kumulacyjnej, które skutecznie utrudniają przyływ ze złoża do kanału perforacyjnego w tej jego części. Wygląd takich pozostałości wkładki kumulacyjnej w skale piaskowcowej i w skale wapiennej przedstawiono na rysunku 3, na obrazach tomograficznych kanału perforacyjnego uzyskanego laboratoryjnie w symulowanych warunkach otworowych.



**Rys. 3.** Obrazy tomograficzne kanału perforacyjnego uzyskanego w symulowanych warunkach otworowych uwidaczniające resztki z wkładki kumulacyjnej w skale piaskowcowej (lewa strona) i wapiennej (prawa strona) [1]

W powyższym opisie skumulowanych zostało tak wiele wad perforacji, że wydawać by się mogło że jest to jedna z gorszych rzeczy, które można zrobić w otworze wiertniczym; tak jednak nie jest – przedstawione wady zostały celowo skumulowane na małym obszarze rysunku, aby je wszystkie przedstawić. W istocie na długości kanału perforacyjnego występują długie odcinki, gdzie nasilenie tych wad jest znikome i przyływ ze złoża może następować.

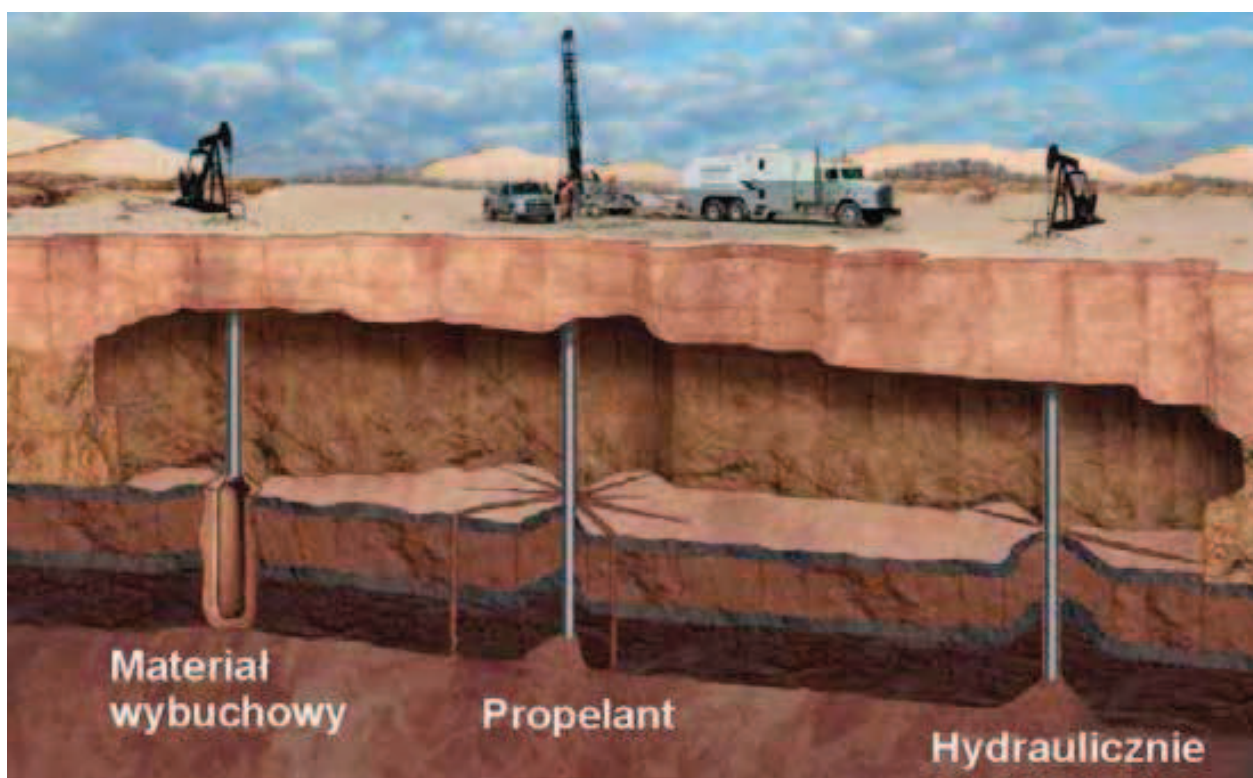
Jednak w przypadku gdy parametry złożowe są słabe i zależy nam aby nie wprowadzać dodatkowego ich pogarszania na perforacjach, lub też zachodzi potrzeba poprawienia przepuszczalności pogorszonej w toku długotrwałej eksploatacji odwiertu, trzeba uciec się do metod stymulacji i intensyfikacji przyływu, wśród których poczesne miejsce zajmuje szczelinowanie.



## 1.2. Różne metody stymulacji i intensyfikacji wydobywania

Historycznie rzecz ujmując pierwszą metodą stymulacji (wprowadzoną w XIX w.) z użyciem materiałów wybuchowych było torpedowanie – w otworze odpalano dynamit uzyskując powiększenie średnicy otworu i utworzenie rozległej sieci spękań w strefie przyotworowej, ale również uszkodzenie struktury skały i dosyć szybką utratę efektów zabiegu, zarazem z ryzykiem poważnego uszkodzenia jego konstrukcji.

Szczelinowanie hydrauliczne rozpoczęto stosować w latach 40-tych XX w., i z powodzeniem stosowane jest do dzisiaj. Trzecią z metod stymulacji, w istocie polegającą również na wytwarzaniu szczelin w skałe strefy przyotworowej jest użycie propelantów – paliw stałych; w trakcie bardzo szybkiego, ale niedetonacyjnego spalania generują one duże ilości gazów, a że cały proces odbywa się pod nieściśliwą przybitką - słupem cieczy w otworze, energia i ciśnienie gazów ze spalania paliwa powoduje szczelinowanie skały otaczającej otwór. Te trzy podejścia do stymulacji – intensyfikacji przepływu w otworze przedstawiono na rysunku 4.

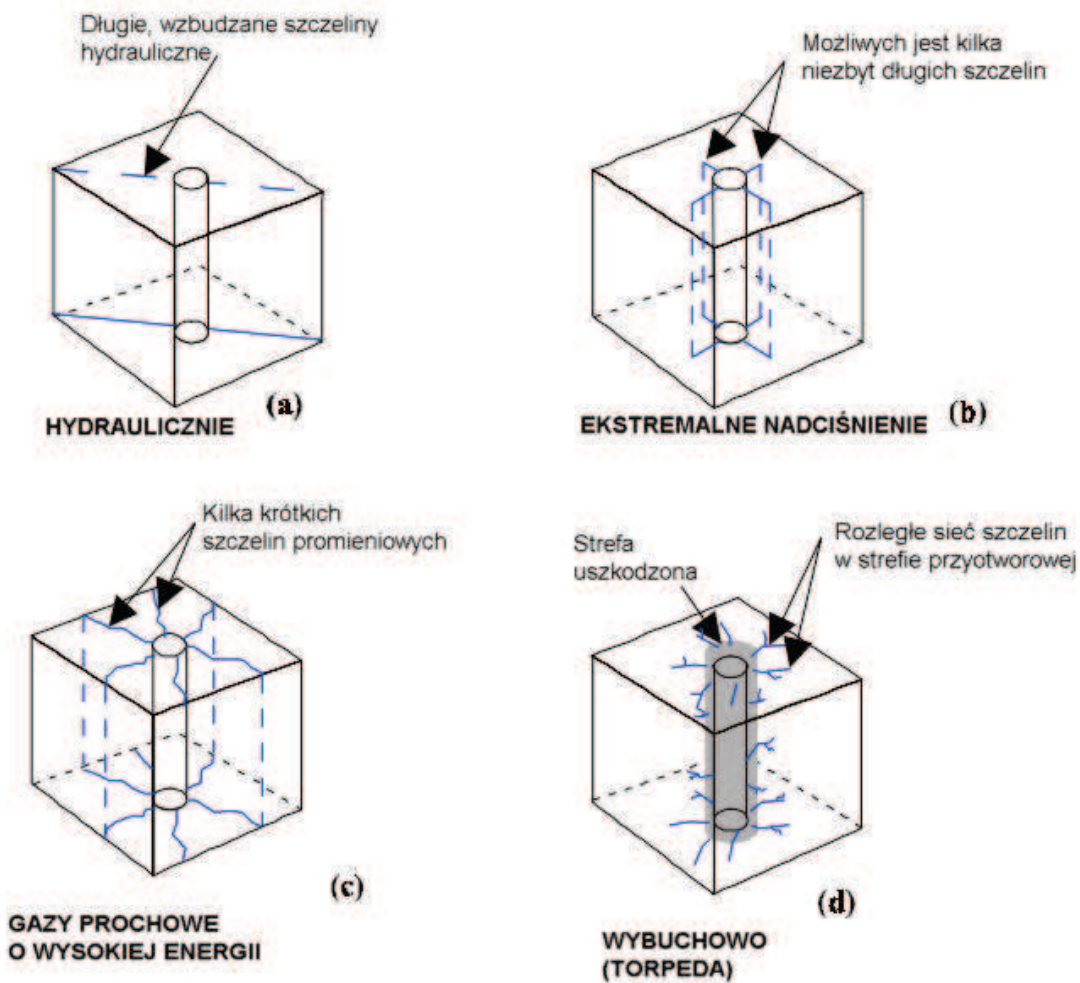


**Rys. 4.** Trzy metody stymulacji i intensyfikacji wydobywania z użyciem materiałów wysokoenergetycznych i szczelinowania hydraulicznego [5]

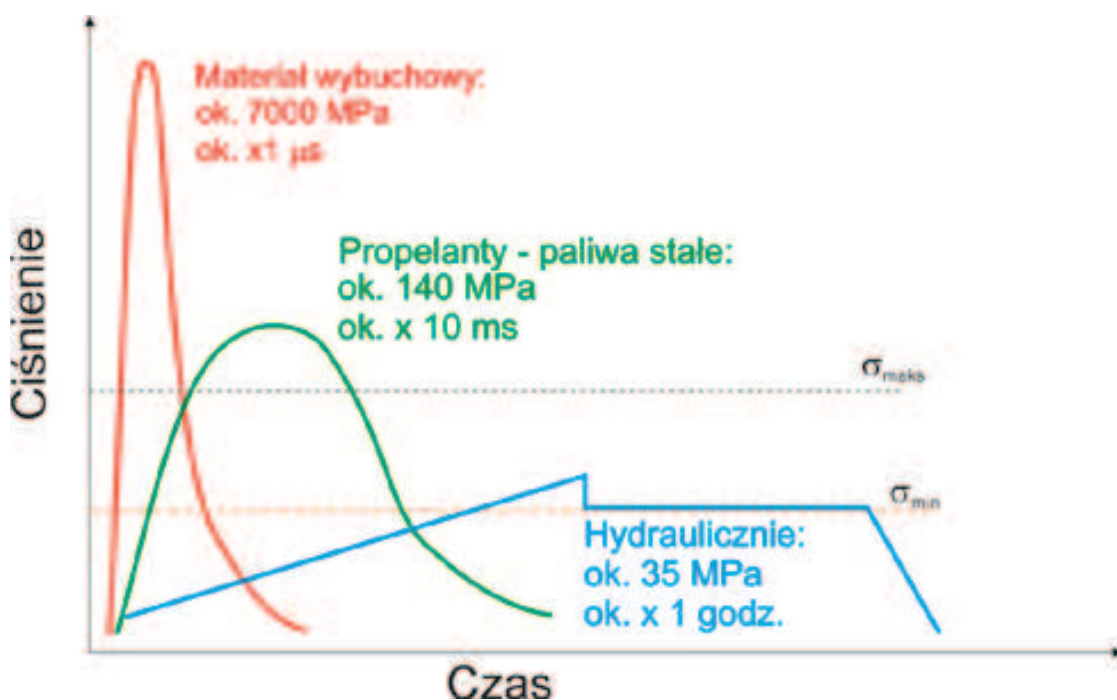
Każda z tych metod powoduje powstawanie innego układu spękań w skałe, z uwagi na odmienną dynamikę działania. Wzory szczelin, powstających w sąsiedztwie otworu wiertniczego w efekcie zastosowania różnych metod stymulacji pokazano na rysunku 5.

Dynamika działania, warunkująca układ spękań powstających w pobliżu strefy przyotworowej sprowadza się do szybkości narastania ciśnienia w strefie wykonywania zabiegu. W przypadku zdetonowania materiału wybuchowego całe zjawisko spalania detonacyjnego trwa kilka do kilkunastu mikrosekund, a ciśnienie osiąga maksymalną wartość rzędu 7000 MPa. W przypadku spalania paliw stałych – propelantów, które to spalanie trwa w tym przypadku kilkadziesiąt milisekund, a więc o trzy rzędy wielkości dłużej niż spalanie detonacyjne, osiągnięte są ciśnienia około 140 MPa. Natomiast w przypadku szczelinowania hydraulicznego, gdzie przyrost ciśnienia uzyskuje się poprzez pompowanie cieczy zabiegowej do otworu, przyrost ciśnienia następuje powolnie (przez kilkadziesiąt minut), osiągając wartość kilkudziesięciu MPa.

Tą różną dynamikę zjawisk zachodzących przy zastosowaniu materiału wybuchowego, propelantów i szczelinowania hydraulicznego przedstawiono na rysunku 6.



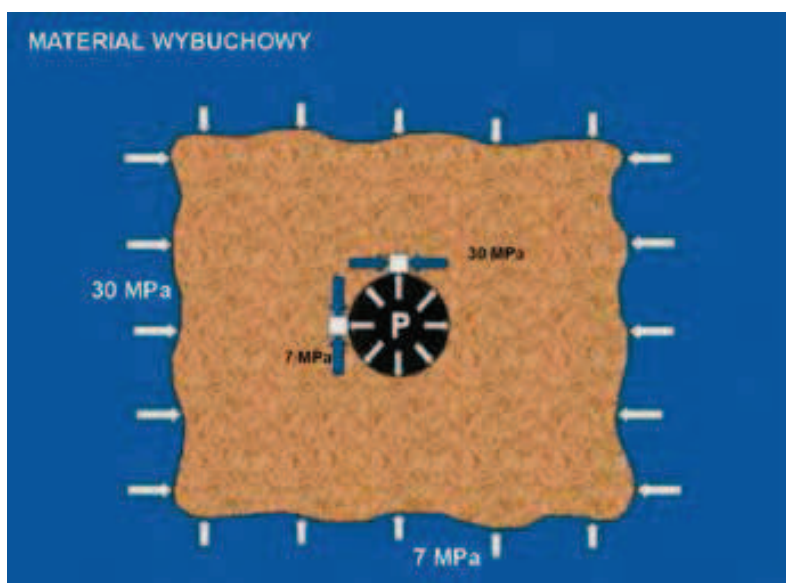
Rys. 5. Wzory szczelin powstających w strefie przyotworowej przy zastosowaniu różnych metod stymulacji / intensyfikacji przepływu



Rys. 6. Poglądowe porównanie dynamiki zmian ciśnienia w przypadku detonacji, deflagracji (propelanty) i szczelinowania hydraulicznego

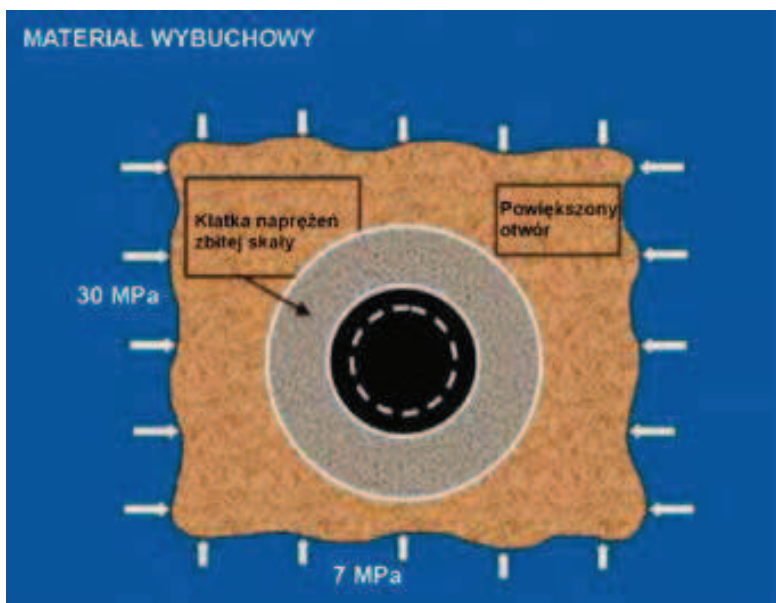
### 1.3. Fizyka oddziaływania różnych metod stymulacji na skałę

W skałach zalegających na pewnej głębokości występuje pewien stan naprężeń, w którym można wyróżnić dwa naprężenia główne – maksymalne i minimalne. Są one ustawione zawsze pod kątem prostym względem siebie. Sytuację takiego stanu naprężeń (naprężenia maksymalnego = 30 MPa i naprężenia minimalnego = 7 MPa) w skałe i ciśnienia, działającego wszechkierunkowo w otworze wiertniczym przebijającym tą skałę pokazano schematycznie na rysunku 7, dla sytuacji gdy w otworze odpalono materiał wybuchowy.



**Rys. 7.** Rozkład naprężeń w skałe i ciśnienia w otworze wywołanego detonacyjnym spalaniem materiału wybuchowego [5]

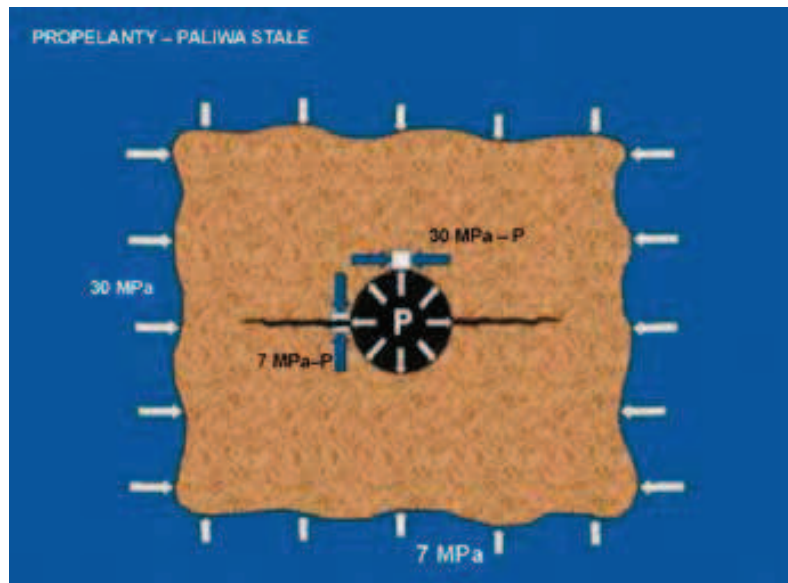
Jak wspomniano wcześniej (zob. rys. 7), ciśnienie wywoływane materiału wybuchowego może sięgać około 7000 MPa – wartość która znacznie przekracza wszystkie naprężenia główne występujące w skałe. Dlatego następuje wszechkierunkowe pęknięcie skały i jej niszczenie, z powiększeniem średnicy otworu, wytworzeniem strefy zbitej z klatką naprężeń wokół otworu i rozbudowanej siatki spękań. Zniszczona struktura skały traci wytrzymałość mechaniczną stwarzając zagrożenie dla konstrukcji otworu. Sytuację tą ilustruje rysunek 8.



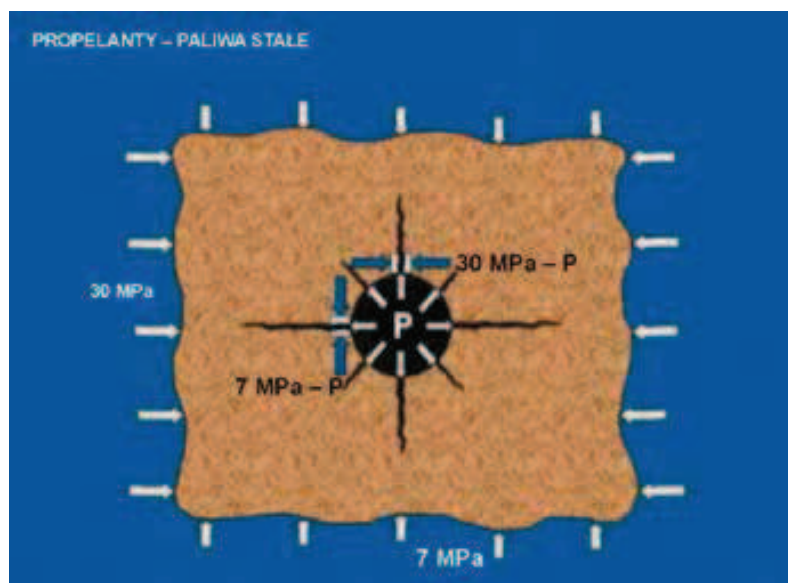
**Rys. 8.** Skutek odpalenia materiału wybuchowego w otworze [5]



W przypadku odpalenia paliwa stałego – propelantu, przyrost ciśnienia jest wolniejszy, a jego maksymalna wartość (zob. rys. 7) sięga około 140 MPa. W pierwszej fazie wzrostu ciśnienia zostanie przekroczone naprężenie minimalne, wskutek czego zostanie zapoczątkowana szczelina (pozioma na rysunku 9). Jednak spalanie paliwa trwa nadal i nadal narasta ciśnienie – toteż w momencie przekroczenia naprężenia maksymalnego zostanie zainicjowana szczelina w kierunku prostopadłym do pierwszej. Jeżeli w tym momencie nadal jest jeszcze niespalone paliwo, a łączny efekt przyrostu objętości gazów ze spalania paliwa i propagacji szczelin, wzrost objętości których następuje kosztem ciśnienia, powoduje dalszy wzrost ciśnienia w otworze, powstają jeszcze szczeliny w kierunkach ukośnych – pod kątem  $45^\circ$  i  $30^\circ$  do naprężeń głównych.

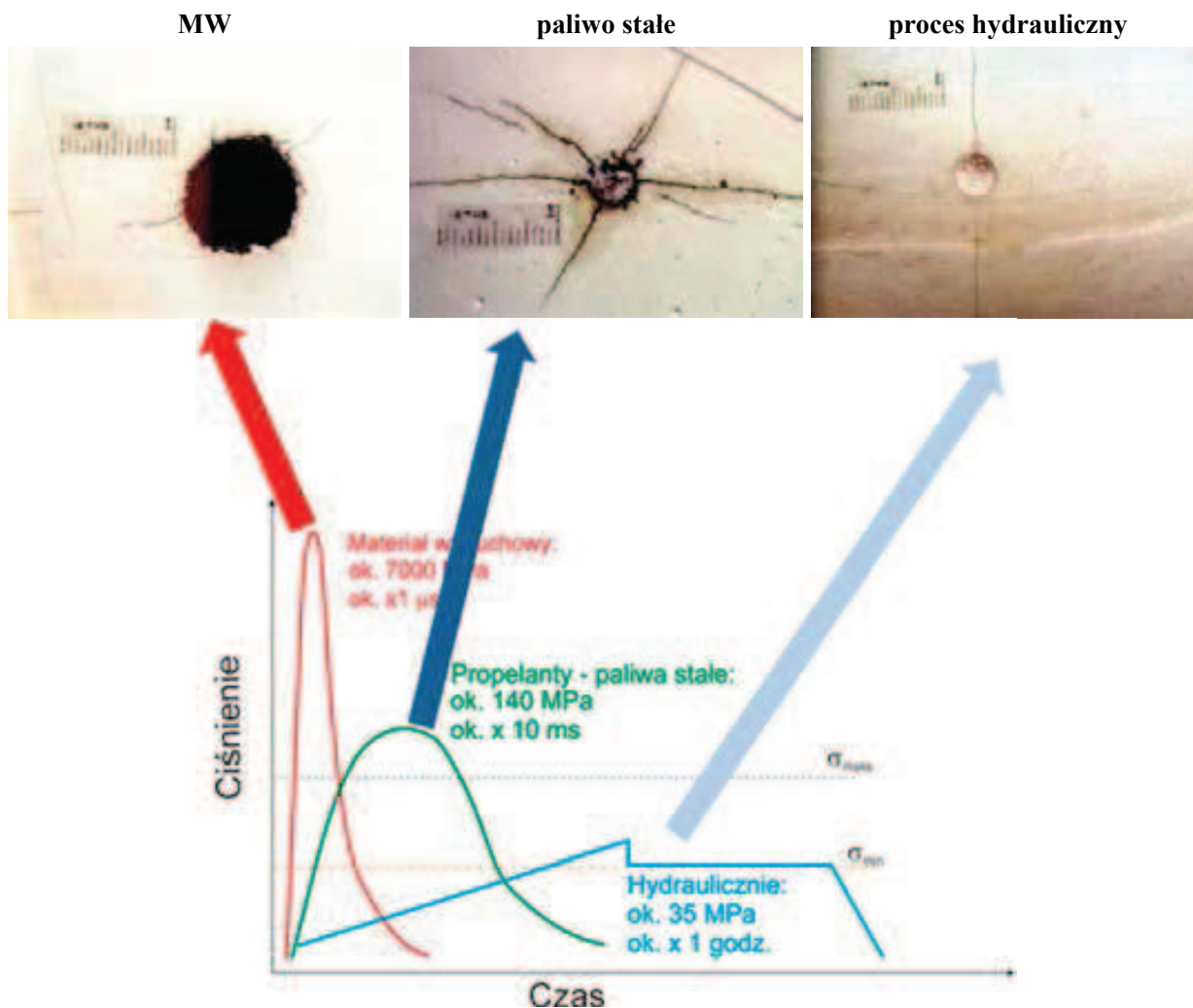


**Rys. 9.** Powstawanie pierwszej szczeliny przy przekroczeniu minimalnego naprężenia poziomego w skale, ciśnienie wytwarzane przez spalanie paliwa stałego [5]



**Rys. 10.** Powstawanie kolejnej, prostopadłej do pierwszej, pary szczelin po przekroczeniu maksymalnych naprężeń poziomych w otworze i dalszych szczelin ukośnych przy dalszym narastaniu ciśnienia [5]

Efekty oddziaływania materiału wybuchowego, paliwa stałego i procesu szczelinowania hydraulicznego na próbki skalne, dla prób wykonanych w badaniach laboratoryjnych zilustrowano na rysunku 11.



**Rys. 11.** Efekty oddziaływania materiału wybuchowego, propelantu i procesu szczelinowania hydraulicznego na powstawanie szczelin w otworze

## 2. Potencjalne obszary stosowania paliw stałych w pracach stymulacyjnych

Stymulacja z użyciem paliw stałych (propelantów może być postrzegana jako metoda tworzenia krótkich szczelin (rzędu kilku metrów), bez potrzeby stosowania rozbudowanego wyposażenia powierzchniowego. Metoda ta może ona znaleźć zastosowanie w następujących sytuacjach:

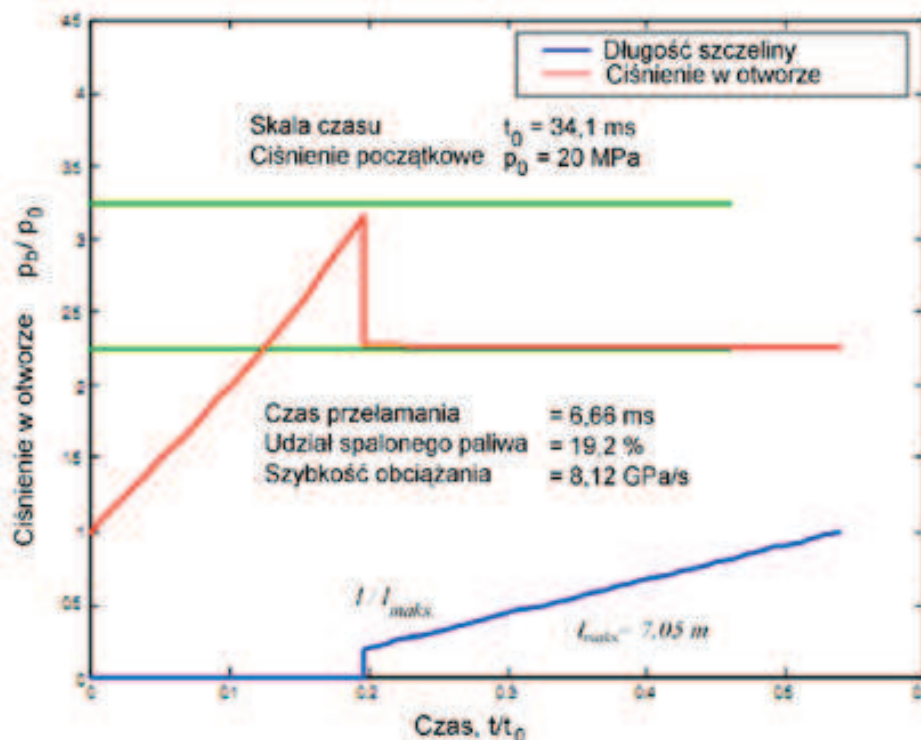
- tworzenie szczelin przekraczających rozległe strefy uszkodzenia zarówno w przypadku otworów nowych, jak i już produkujących,
- szczelinowanie przekraczające uszkodzenie perforacyjne, w przypadku gdy możliwe do uzyskania podciśnienie jest niewystarczające,
- szczelinowanie wstępne przed szczelinowaniem hydraulicznym, w celu „przełamania” formacji,
- poprawa łączności ze szczelinami naturalnymi.

Szczególnie interesujące może być, w świetle rosnącego zainteresowania pozyskiwaniem gazu z łupków, gdzie istotą udostępnienia złoża są rozległe i wielokrotne operacje szczelinowania hydraulicznego, wykorzystanie paliw stałych jako środka „pierwszego podejścia” pozwalającego wykonać przede wszystkim tzw. przełamanie skały, czyli zapoczątkowanie głębienia szczeliny, na co potrzebne jest ciśnienie o ok. (20 ÷ 30) % wyższe, niż ciśnienie potrzebne później do propagacji szczeliny w głąb złoża.



## 2.1. Wykorzystanie paliw stałych jako zabiegu wstępnego przed szczelinowaniem hydraulicznym

Rysunek 12 przedstawia wykres przebiegu ciśnienia szczelinowania hydraulicznego sporządzony na podstawie obliczeń modelowych, gdzie widać wyraźnie o ile wyższe musi być ciśnienie zapoczątkowania szczeliny, niż to, które potrzebne jest do jej dalszego rozwijania. Wykonanie wyprzedzającego zabiegu szczelinowania za pomocą paliw stałych i zapoczątkowanie szczeliny pozwala znacznie obniżyć ciśnienie konieczne do wytwarzania przez pompy i moc agregatów zainstalowanych na powierzchni w operacji szczelinowania, a tym samym zmniejszyć wielkość emisji do atmosfery. Zmniejsza się również obciążenie konstrukcji otworu i ryzyko jej uszkodzenia.



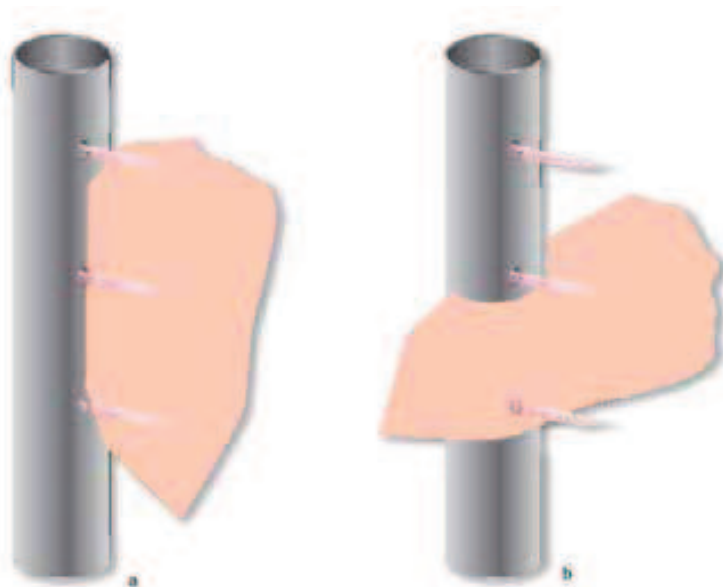
**Rys. 12.** Przebieg ciśnienia szczelinowania i długość tworzonej szczeliny na podstawie obliczeń na modelu. Linie zielone przedstawiają minimalne (dolna) i maksymalne naprężenie poziome w skałach

Inną, wartą podkreślenia cechą oddziaływania paliwa stałego spalanego w orurowanych i perforowanym otworze jest to, że inicjuje ono szczeliny we wszystkich perforacjach i zawsze w osi otworu, z uwagi na to, że początkowe ciśnienia oddziaływania są znacznie wyższe niż naprężenia główne występujące w skałach. Dopiero później, gdy energia gazów ulegnie istotnemu zużyciu, powstająca szczelina zaczyna układać się w płaszczyźnie maksymalnych naprężeń.

Natomiast w przypadku szczelinowania hydraulicznego zapoczątkowanie szczeliny może zachodzić nawet w pojedynczym kanale perforacyjnym – w najsłabszym miejscu – a pozostałe kanały perforacyjne będą wówczas wykorzystane w znacznie mniejszym stopniu. Ilustruje to rysunek 13.

Przy zadaniu ciśnienia płynu szczelinującego szuka on ścieżki najmniejszego oporu dla przepływu – często poprzez mikroprzestrzeń między płaszczem cementowym, a formacją skalną, do momentu znalezienia słabszego punktu i zwrotu do preferowanego kierunku – powstaje krętość zwiększająca ciśnienie zabiegu, ograniczenie przepływu i przedwczesne wytrącanie podsadzki

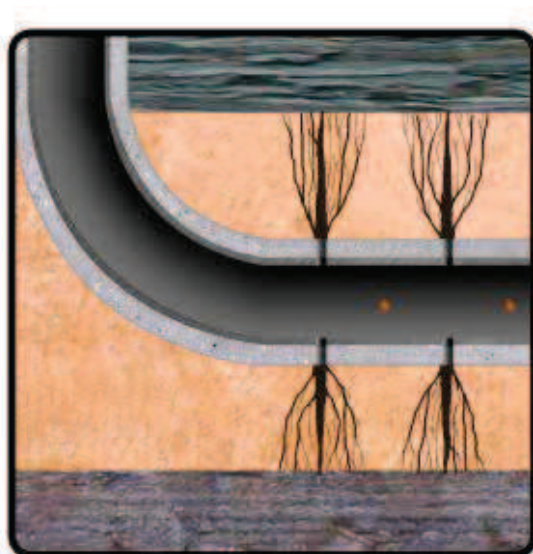
Zapoczątkowanie szczeliny poprzez zastosowanie propelantów, indukujących szczeliny poprzez wszystkie kanały perforacyjne z przelaniem strefy zmiażdżonej, pozwala zmniejszyć ciśnienie szczelinowania – zmniejszenie krętości, oporów przepływu i ogólnie przyczynić się do SUKCESU zabiegu szczelinowania hydraulicznego.



**Rys. 13.** Zapoczątkowywanie szczeliny przez kanały perforacyjne w przypadku oddziaływania: a) spalania paliwa stałego – propelantu; b) procesu szczelinowania hydraulicznego (w otworach płytszych i silnie nachylonych może się zdarzać, że szczelina nie leży w osi otworu [6])

## 2.2. Stosowanie paliw stałych w otworach poziomych

Paliwa stałe umożliwiają wykonanie w jednym marszu stymulacji wielu interwałów perspektywnych. Podczas gdy szczelinowanie hydrauliczne zawsze wykonywane jest etapowo, z oddzielaniem poszczególnych interwałów zabiegu od siebie za pomocą pakerów, to w przypadku paliw stałych można zapuścić do otworu cały wielozłonowy zestaw paliw na przewodzie, rozstawionych zgodnie z projektem robót stymulacyjnych w interwałach planowanych do szczelinowania i odpalić. Cały proces spalania paliwa stałego odbywa się pod przybitką cieczy, a oddziaływanie powstających gazów jest zasadniczo ograniczone tylko do interwału wyznaczonego przez długość ziaren paliwa: według obliczeń modelowych, ruch słupa cieczy powyżej i poniżej spalającego się ziarna paliwa wynosi zaledwie kilkadziesiąt centymetrów (z uwagi na bezwładność i nieściśliwość) w trakcie całego procesu spalania. Zatem oddziaływanie to jest miejscowe.



**Rys. 14.** Schemat szczelinowania z użyciem paliw stałych w otworze poziomym [6]

Zalety takiego zabiegu są następujące:

- Możliwość taniego stymulowania długich interwałów – w jednym marszu można wprowadzić do otworu nawet wieśset metrów propelantów.
- Szczeliny są tworzone na całej długość horyzontu produktywnego, nie ma konieczności etapowego wykonywania prac, jak w przypadku szczelinowania hydraulicznego.
- Minimalna ilość wyposażenia potrzebnego na miejscu.
- Zabieg nie obciąża środowiska – ilość płynów i chemikaliów potrzebnych do jego wykonania jest minimalna.

### 2.3. Zastosowanie zabiegu z użyciem propelantów w utworach o naturalnej szczelinowatości

Jeżeli zachodzi potrzeba stymulacji w zbiorniku o naturalnej szczelinowatości, to szczelinowanie hydrauliczne o tyle jest niekorzystne, że będzie powodować powiększanie jednej lub dwóch, już istniejących szczelin. Natomiast użycie propelantów, którego skutkiem jest tworzenie kilku (4 ÷ 6) szczelin promieniowych o zasięgu do kilku metrów, spowoduje połączenie systemu szczelin naturalnych szczelinami promieniowymi i znaczną poprawę warunków przepływu, jak pokazano na rysunku 15.



**Rys. 15.** Porównanie oddziaływania procesu szczelinowania hydraulicznego i zabiegu z użyciem paliw stałych w przypadku złoża o naturalnej szczelinowatości [5]

### 2.4. Zabieg stymulacji z użyciem paliw stałych, a zagadnienia ochrony środowiska

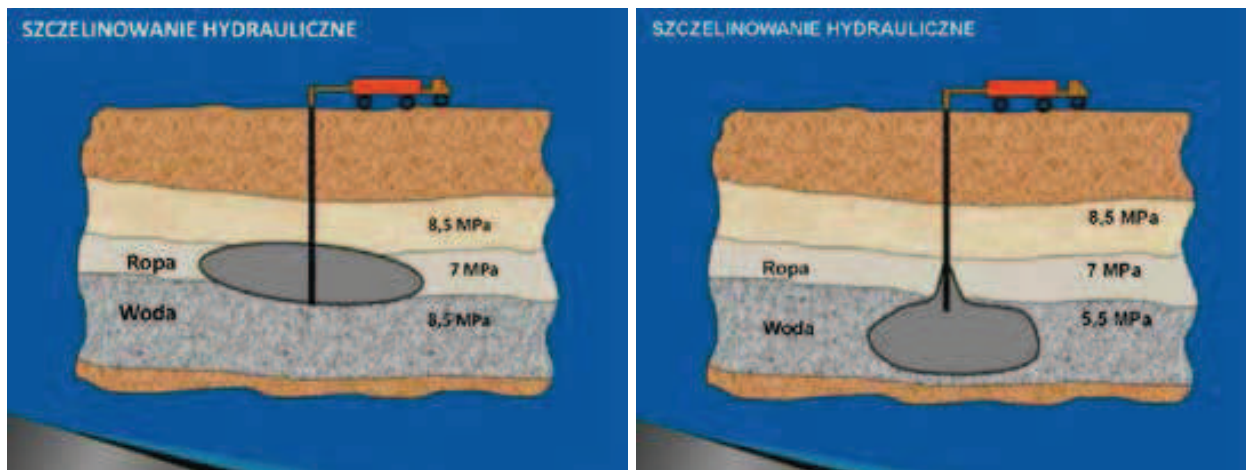
W operacjach stymulacji wykonywanych z użyciem paliw stałych do otoczenia nie przedostają się praktycznie żadne substancje wykorzystywane przy zabiegu lub tworzone w jego trakcie. Przybitka cieczowa, której użycie jest koniecznym warunkiem wykonania zabiegu to najczęściej solanka, albo specjalnie przygotowana ciecz (również ropa), kompatybilna z płynami występującymi w skale złożowej, występująca w objętości mniejszej, niż objętość samego otworu wiertniczego.

Szczeliny tworzone w trakcie zabiegu z użyciem propelantów rozciągają się jedynie w kierunku promieniowym i nie mają tendencji do rozrastania się w pionie, z uwagi na ograniczoną ilość gazów ze spalania paliwa i dynamikę oddziaływania. W przeciwieństwie do tego w szczelinowaniu hydraulicznym rozrost szczeliny w pionie praktycznie bardzo trudno jest kontrolować, co stwarza ryzyko przedwczesnego zawodnienia złoża i otworu wiertniczego, albo zanieczyszczenia warstw wodonośnych płynami zabiegowymi (zob. rys. 16).

Wspomniano już wcześniej o tym, że zabieg szczelinowania hydraulicznego wiąże się z użyciem dużej ilości agregatów pompowych, mieszalników, cystern, orurowania, itp. na powierzchni ziemi, natomiast do wykonania zabiegu z użyciem paliw stałych wystarczy pojazd z małym wyciągiem kablowym. Takie obrazowe porównanie skali obu przedsięwzięć pokazano na rysunku 17.



Oczywiście nie chodzi tutaj o to by dyskredytować szczelinowanie hydrauliczne, a gloryfikować użycie propelantów – a raczej o to, by podkreślić, że każda z tych metod ma swój właściwy obszar zastosowania i że każda z nich powinna znajdować się w „przyborniku narzędziowym” inżynierów złożowych.



*W przypadku gdy warstwa wyżej- i niżej legła mają większe wytrzymałości, niż warstwa złożowa, następuje naturalne ograniczanie rozrostu szczeliny w pionie.*

*W skrajnie niekorzystnym przypadku, gdy warstwa wyżej- lub niżej legła ma znacznie niższą wytrzymałość, szczelina może rozbudować się w tej warstwie, zamiast w warstwie złożowej.*

**Rys. 16.** Ryzyko niekontrolowanego rozrostu szczeliny w przypadku procesu szczelinowania hydraulicznego i znacznej różnicy naprężeń w warstwach leżących powyżej i poniżej warstwy złożowej [5]



**Rys. 17.** Porównanie skali przedsięwzięć szczelinowania hydraulicznego i szczelinowania z użyciem paliw stałych: a) Duża operacja szczelinowania hydraulicznego; b) Zabieg z użyciem propelantów

### 3. Wnioski

3.1. Wyniki dotychczasowych zastosowań propelantów do prac stymulacyjnych / intensyfikacyjnych potwierdzają, że jest to skuteczne narzędzie, które powinno mieć swoje miejsce w „przyborniku

- narzędziowym” każdego wykonawcy tego typu prac.
- 3.2. Propelanty bardzo skutecznie zmniejszają ciśnienie zapoczątkowania propagacji szczelin przy zabiegu hydraulicznym – mniejsza jest niezbędna moc agregatów pompowych, mniejsze emisje spalin do atmosfery, obciążenie konstrukcji otworu i środowiska.
  - 3.3. Użycie propelantów w warunkach ryzyka zawodnienia otworu poprzez niekontrolowany rozrost szczeliny w pionie, albo w trudnych warunkach terenowych często stanowi jedyną dostępną opcję wykonania zabiegu stymulacji.
  - 3.4. Zabieg jest prosty w wykonaniu, nie powoduje zużywania wielkich ilości cennej wody, ani dewastacji na powierzchni.
  - 3.5. W otworach poziomych można wykonać w jednym marszu stymulację wieluset metrów horyzontu produktywnego, przy niewielkim obciążeniu środowiska i kosztach wielokrotnie mniejszych niż w przypadku zabiegu hydraulicznego.
  - 3.6. Użycie propelantów w połączeniu z perforatorami jawi się skutecznym i ekonomicznie opłacalnym zabiegiem stymulacji przyływu na starych złożach, gdzie zwrot nakładów poniesionych na zabieg hydrauliczny jest mało prawdopodobny.

## Literatura

- [1] Bartusiak R., Halleck P.M., Behrmann L.A., *Experiments investigate underbalance flow velocity and volume needed to obtain perforation cleanup*. JPSE 17, 19-28, 1997.
- [2] Griesgraber K. i in., *Opracowanie procedur doboru poziomów ropo- gazonośnych dla stymulacji przyływu prochowymi generatorami ciśnienia*. Instytut Nafty i Gazu, Zadanie 15/STS, 2002.
- [3] Griesgraber K., Frodyma A. i in., *Małośrednicowy prochowy generator ciśnienia zapuszczany do odwiertu poprzez rurki wydobywcze (syfonowe); warunki stosowania: ciśnienie  $P = 60 \div 80$  MPa, temperatura  $T$  do  $130^{\circ}\text{C}$* . Instytut Nafty i Gazu, zadanie 437/STS, listopad 2005.
- [4] Manrique J.F., Bjornen K., Economides-Ehlig C., *Systematic Methodology for Effective Perforation and Fracturing Strategies*. SPE 38630, przedstawiony na ATCE 1997, San Antonio, Teksas, 5–8.10.1997.
- [5] Schmidt R.A., Prezentacja firmy The GasGun, Inc. Internet: <http://www.youtube.com/watch?v=tKeWQLtG2G0>
- [6] Materiały informacyjne The Propellant Technology Development Group.
- [7] *From Reservoir Specifics to Stimulation Solutions*. Publikacja Schlumberger, Oilfield Review, Zima 2000/2001.