

Antoni Frodyma
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Zasady i podstawy projektowania zabiegów stymulacji otworów wiertniczych z zastosowaniem paliw stałych

Wprowadzenie

Szczelinowanie z zastosowaniem paliw prochowych jest uznawane za tanią alternatywę dla konwencjonalnego szczelinowania hydraulicznego w sytuacjach, gdy nie są dostępne ciężkie urządzenia pompowe, istnieje zagrożenie naruszenia konstrukcji odwiertu w trakcie obróbki lub koszt tradycyjnego zabiegu nie znajduje uzasadnienia.

Z uwagi na wysokie impulsowe ciśnienia i siły dynamiczne oddziałujące na orurowanie odwiertu, jak również ze względu na planowany do osiągnięcia cel zabiegu, tak jedna, jak i druga metoda wymaga właściwego zaprojektowania obliczeniowego. O ile w przypadku szczelinowania hydraulicznego podejście obliczeniowe do projektowania jest dość dobrze poznane i opracowane, to w przypadku stymulacji z zastosowaniem generatorów prochowych stwarza ono wiele problemów – z uwagi na wielką dynamikę zjawisk zachodzących w toku spalania paliwa prochowego i jego oddziaływanie z warstwą złożową, jak również ze względu na mnogość czynników warunkujących fizyczny przebieg tego procesu.

Z tą myślą przedstawia się model szczelinowania z użyciem gazów prochowych. Koncentruje się on głównie na jakościowej analizie szczelinowania z wykorzystaniem gazów prochowych, z zastosowaniem uproszczeń dotyczących właściwości skały, wzorów dotyczących rozwijania się szczeliny oraz hydrauliki otworu wiertniczego.

W przeciwieństwie do konwencjonalnych symulacji szczelinowania hydraulicznego, wielkość początkową szczelin przyjmuje się tutaj za zerową, a ciśnienie zapoczątkowania szczeliny (przełamania) wraz z geometrią

rozwijającej się szczeliny – jako w pewnym stopniu znane. Faza dynamiczna rozwijania się szczeliny nie może być modelowana z użyciem konwencjonalnego podejścia, opracowanego dla szczelinowania hydraulicznego i jest przedstawiana jako „przeskok” szczeliny lub propagacja natychmiastowa na pewną odległość od otworu.

Możliwe zastosowania szczelinowania z zastosowaniem gazów prochowych obejmują:

- wstępne szczelinowanie przed konwencjonalnym szczelinowaniem hydraulicznym, w celu zmniejszenia ciśnienia zapoczątkowania szczeliny oraz minimalizacji ryzyka niepożądanego propagacji szczeliny (efekt halo, efekt krętości szczeliny, bariery o małych naprężeniach),
- poprawę chłonności, co może być również użyteczne do powtórnego zatłaczania w trakcie testów otworu – często uważa się, że zastosowanie szczelinowania gazami prochowymi do stymulacji wydobywania jest ograniczone do formacji z występującymi w nich kontrastami naprężeń, chyba że zastosowana zostanie skuteczna technika zapobiegania zamykaniu się szczeliny (wprowadzanie podsadzki),
- stymulację wydobywania z otworów ropnych i gazowych.

Uważa się, że zamykanie się szczelin utworzonych pod działaniem gazów prochowych jest ograniczane dzięki dyslokacji ścinającej, do której dochodzi na skutek dynamicznego charakteru oddziaływania gazów prochowych na skałę w trakcie propagacji szczeliny przy występowaniu różnicy naprężeń głównych w skałe.

Podstawy

Eksperymenty laboratoryjne i terenowe, które przeprowadzono w późnych latach siedemdziesiątych i wczesnych 80. ub. wieku [1, 2, 4–12, 23–27] wykazały, że wywieranie ciśnienia w otworze drogą spalania paliw pędnych może być skutecznie wykorzystywane do tworzenia wielu szczelin w skałach otaczających otwór. Ta technika, w której wykorzystywano ładunek paliwa prochowego o średnicy pełnego otworu, uzyskała nazwę szczelinowania gazami o wysokiej energii. Została dostosowana do generowania ciśnienia w otworze i wytwarzania wielu szczelin, rozchodzących się promieniowo od osi otworu, bez kruszenia otaczających skał. Za główne cele zabiegów uważano wówczas zbiorniki gazu ziemnego zalegającego w utworach o niskiej przepuszczalności, jak również utwory zwężonych łupków, które można wykorzystać do podziemnego magazynowania niebezpiecznych odpadów. W pierwszym przypadku szczeliny powinny zwiększać przewodność hydrauliczną w strefie przyotworowej, ułatwiając przepływ gazu do otworu. W drugim zastosowaniu należy ustanowić żądaną chłonność otworu/formacji.

Pierwsze próby zostały wykonane na poligonie w Nevada, w suchych otworach przebijających tufy. Z kolei badania wykonane w chodniku sztolni kopalni umożliwiły badaczom sprawdzenie wzoru powstających szczelin, który badano w zależności od typu i wielkości paliwa prochowego, naprężeń panujących *in situ* i średnicy otworu. Na koniec opracowano technikę projektowania zabiegu z użyciem paliwa prochowego, pozwalającą uzyskać żądany impuls ciśnienia i wzór powstających szczelin [4, 23, 24, 26, 27]. Metoda została przebadana w otworach pionowych i przeniesiona do następnej fazy opracowania, z ukierunkowaniem głównie na zastosowania w pełnej skali w otworach ropnych i gazowych, celem poprawy ich produktywności [1, 2, 5–12, 16, 19, 25]. Zakończone sukcesem prace szczelinowania ciśnieniem gazów prochowych zostały

przeprowadzone w łupkach dewońskich [5] i zwężonych piaskowcach na głębokościach od 200 m do 1100 m.

Wpływ rur okładzinowych i perforacji na szczelinowanie gazami prochowymi badano w opracowaniach [13, 22]. Wykazano, że dla prawidłowo zaprojektowanych perforacji i ładunków paliwa prochowego możliwe jest utworzenie wielu szczelin przez perforowane rury okładzinowe bez ich uszkodzenia.

Pierwszy pełny model obliczeniowy szczelinowania ciśnieniem gazów prochowych został podany i opracowany w pracy [19]. Model ten opiera się na klasycznej teorii szczelinowania hydraulicznego [14] i obejmuje również szczeliny wielokrotne, efekt magazynowy odwiertu, tarcie wywołane przepływem laminarnym i turbulentnym w szczelinach tworzonych pod ciśnieniem gazów, straty na filtrację i straty cieplne poprzez powierzchnie szczelin, a także zależną od ciśnienia kinetykę spalania paliwa prochowego. Oszacowano długość szczeliny, szczytowe ciśnienie, czas narastania i czas zanikania ciśnienia dla dosyć szerokiego zakresu warunków.

Pomimo długiej historii badań, rozwoju i udanych zastosowań, szczelinowanie ciśnieniem gazów prochowych jako technika zwiększania produkcji jest nadal uznawane za niebezpieczne i niewiarygodne w porównaniu do innych metod stymulacji otworów, w tym konwencjonalnego szczelinowania hydraulicznego. Argumenty przeciwko szczelinowaniu z użyciem gazów prochowych są proste i przejrzyste. Na przykład, gdy chodzi o zwiększenie produktywności, częstym pytaniem stawianym przez oponentów jest: „Jak to może działać, skoro wszystkie szczeliny zamykają się po rozładowaniu ciśnienia w otworze?”. Analiza zaprezentowana w niniejszym artykule może pomóc w zrozumieniu mechanizmu szczelinowania ciśnieniem gazów prochowych i jego najlepszego zastosowania w przemyśle naftowym.

Mechanizm szczelinowania z użyciem paliw prochowych

Właściwość szczelinowania z użyciem paliw prochowych, która jest najbardziej godna uwagi, to zdolność do tworzenia wielu szczelin i kontrolowania ich wzoru lub – mówiąc wprost – liczby rozwijających się szczelin. Typowe scenariusze szczelinowania obserwowano eksperymentalnie [26]. W zależności od szybkości narastania ciśnienia w otworze wzory powstających szczelin znacznie się różnią.

Jeżeli szybkość narastania ciśnienia jest mała, w kierunku od otworu rozwija się szczelina jedno- lub dwu-

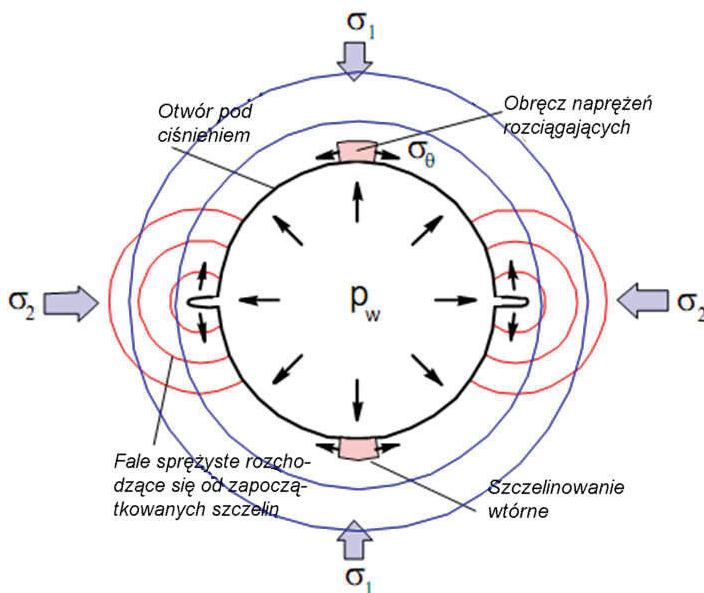
skrzydłowa, w kierunku prostopadłym do minimalnego naprężenia głównego.

Przy wyższej szybkości narastania ciśnienia występuje wiele szczelin. Szczeliny te rozwijają się przede wszystkim w kierunkach promieniowych. Liczba powstających szczelin może zależeć od szybkości narastania ciśnienia, właściwości sprężystych skały i jej wytrzymałości, wielkości otworu, naprężeń panujących *in situ* oraz ciśnienia porowego, jeżeli skała jest nasycona płynem.

Jeżeli szybkość narastania ciśnienia jest za wysoka, następuje szczelinowanie wybuchowe, charakteryzujące się tworzeniem siatki szczelin i kruszeniem skały, wywołując znaczne uszkodzenie mechaniczne wokół otworu pod ciśnieniem. Ten typ stymulacji jest niepożądany, ponieważ prowadzi do zmniejszenia przewodności hydraulicznej w strefie przyotworowej oraz jest wyjątkowo niebezpieczny dla konstrukcji otworu i jego stabilności.

Siatka szczelin

Wyjaśnienie zjawiska tworzenia siatki szczelin przy szybkim narastaniu ciśnienia przedstawione jest w opracowaniu [27]. Główny proces stanowi tutaj dynamiczne obciążenie otworu w kierunkach promieniowych przez wzrastające ciśnienie, któremu towarzyszy przejściowa zmiana rozkładu naprężeń obwodowych, wywołwana przez inicjowanie i rozwijanie szczelin. Te dwa pola naprężeń dynamicznie oddziałują na siebie, tworząc warunki dla progresywnego powstawania siatki szczelin. Schemat oddziaływania pomiędzy falami sprężystymi wywołanymi wzrostem ciśnienia w otworze oraz falami sprężystymi rozprzestrzeniającymi się od zapoczątkowanych szczelin pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Siatka szczelin indukowana przez dynamiczny wzrost ciśnienia

Podczas quasi-statycznego zwiększania ciśnienia w otworze w warunkach kontrastu naprężeń ($\sigma_1 < \sigma_2$), warunek zapoczątkowania szczeliny jest osiągany najpierw wzdłuż płaszczyzny prostopadłej do najmniejszego naprężenia głównego σ_1 , gdzie naprężenie obwodowe przy ściance otworu σ_θ staje się równe wytrzymałości skały na rozciąganie σ_T .

Ciśnienie w otworze p_w , które odpowiada zapoczątkowaniu szczelinowania, jest znane w mechanice skał jako ciśnienie przełamania [14]. W przypadku skały nasyconej płynem może być ono wyrażone jako:

$$p_B = 3\sigma_1 - \sigma_2 - p_0 + \sigma_T \quad (1)$$

gdzie p_0 jest początkowym ciśnieniem porowym przed rozpoczęciem obciążania skały. Przy formułowaniu równania (1) zakłada się, że nadciśnienie $p_w - p_0$ jest przykładane natychmiastowo, dlatego też przepływ płynu i zmiana ciśnienia porowego wywołane przez wzrost ciśnienia w otworze mogą być zaniedbane.

Przy obciążaniu quasi-statycznym dwie szczeliny utworzone na skutek przełamania otworu kontynuowałyby propagację w kierunku od otworu. Rozładowanie naprężeń obwodowych σ_θ wzdłuż ścianki otworu wskutek przemieszczeń powierzchni szczeliny, zazwyczaj zapobiega dalszemu inicjowaniu szczelin na powierzchni otworu.

Sytuacja wygląda jednak inaczej w przypadku obciążania dynamicznego. Przede wszystkim warunek wytrzymałości (1) już nie obowiązuje, ponieważ skała może wytrzymać w krótkim czasie znacznie wyższe obciążenie niż warunek wytrzymałości w warunkach quasi-statycznych.

W wyniku tego inicjowanie pierwszych szczelin na ścianie otworu następuje przy ciśnieniach p_w zazwyczaj znacznie wyższych niż ciśnienie przełamania p_B określone w równaniu (1). Jeżeli szybkość narastania ciśnienia w otworze jest wystarczająco duża, fale naprężeń obwodowych od tworzonych szczelin nie mogą natychmiast odciążyć skały strefy przyotworowej od naprężeń rozciągających i dlatego inicjowanie szczeliny może być kontynuowane po początkowym przełamaniu. Nowe szczeliny są tworzone pomiędzy szczelinami już istniejącymi do momentu osiągnięcia stanu rozładowania naprężeń. Im wyższa prędkość narastania ciśnienia, tym bardziej intensywne jest zachodzące szczelinowanie.

Propagacja szczeliny po przełamaniu

W warunkach obciążania dynamicznego przełamanie otworu poddanego oddziaływaniu ciśnienia nie zachodzi w sposób natychmiastowy, ale w skończonym czasie, wymaganym do zmiany rozkładu i ustabilizowania się stanu naprężeń wokół otworu. Czas charakterystyczny przełamania t_B może więc być w przybliżeniu oszacowany jako:

$$t_B = d/C \quad (2)$$

Dla otworu o średnicy $d = 0,2$ m i prędkości fali podłużnej $C = 2000$ m/s: $t_B \approx 0,1$ ms.

Można się spodziewać, że wielkość szczelin powstałych wokół otworu w czasie t_B po zainicjowaniu przełamania będzie rzędu promienia otworu, $d/2$ albo mniejsza, ponieważ prędkość dynamicznej propagacji szczelin jest ograniczona prędkością fali poprzecznej (znanej również jako prędkość Rayleigha) [15].

$$C_R = \sqrt{\frac{G}{P}} < C \quad (3)$$

Dalszy rozwój zdarzeń zależy od wzoru szczelin utworzonych w trakcie przełamania oraz scenariusza narastania ciśnienia w otworze.

Jeżeli narastanie ciśnienia zakończy się na skutek odpływu do rozwijających się szczelin i rozszerzania się strefy podwyższonego ciśnienia wzdłuż otworu, szczeliny szybko osiągną stan równowagi i będą kontynuować propagację w trybie quasi-statycznym. Jeżeli narastanie ciśnienia będzie trwać nadal, propagacja dynamiczna może być kontynuowana do momentu, gdy zostanie uzyskana krytyczna wielkość odpływu lub nastąpi całkowite zużycie paliwa prochowego.

Trudno jest ocenić, jak długo trwa dynamiczna faza szczelinowania, i oszacować długość szczelin utworzonych do momentu, gdy proces przejdzie w tryb quasi-statyczny. Wobec braku obserwacji doświadczalnych, pozostają w tej mierze jedynie spekulacje. W poprzednich analizach [19] stosowano następujące dwa argumenty [20]:

- kryterium propagacji szczeliny przy obciążeniu quasi-statycznym, opierające się na krytycznym skupieniu naprężenia w pobliżu końcówki szczeliny, może być zastosowane do dynamicznej propagacji szczeliny,
- szacowane współczynniki intensywności naprężenia dynamicznego w różnych warunkach są jedynie o 30% mniejsze niż ich quasi-statyczne odpowiedniki i dlatego do modelowania dynamicznej propagacji szczeliny można wykorzystać konwencjonalną odporność na kruche pękanie.

Stąd też zastąpienie dynamicznej propagacji szczeliny przez quasi-statyczną wydaje się być racjonalnym przybliżeniem, a pierwszy postęp w modelowaniu i pojmowaniu szczelinowania z użyciem gazów prochowych osiągnięto

z zastosowaniem klasycznej mechaniki powstawania pęknięć [19]. Takie podejście ma jednak wady. Przede wszystkim wymaga znajomości warunków początkowych dla szeregu tworzonych szczelin i ich początkowych długości. Trudno jest spodziewać się, by te informacje były kiedykolwiek dostępne, stąd też ilościowe przewidywanie inicjowania szczelin i ich propagacji po przełamaniu otworu wydaje się problematyczne. Po drugie, istnieją nierozwiązane zagadnienia dotyczące fazy początkowej propagacji szczeliny (opóźnienie pomiędzy czołem płynu szczelinującego wewnątrz szczeliny a szczytem szczeliny, nieciągłości płynu przed czołem płynu szczelinującego, co sprawia, że ciśnienie przed czołem płynu jest nieokreślone, itp.), które nie pozwalają na skuteczne modelowanie inicjowania szczeliny. Na koniec w tym podejściu nie bierze się pod uwagę współzawodnictwa pomiędzy dynamiczną propagacją szczeliny, filtracją do szczelin i kontynuowanym narastaniem ciśnienia w otworze, które w rzeczywistości determinuje reżim inicjowania szczeliny.

Projektowanie zabiegu szczelinowania z użyciem gazów prochowych nadal wydaje się raczej magią aniżeli formalną procedurą, opartą na jasno pojmowanej fizyce [28]. Powodzenie zabiegu szczelinowania z zastosowaniem gazów prochowych jest zazwyczaj oceniane na podstawie poprawy produktywności lub chłonności odwiertu, których nie można dopasować do żadnych istniejących modeli. Zasadnicza trudność wiąże się z faktem, że wzór tworzonych szczelin jest nieznan, tj. liczba szczelin, ich długości i szerokości, a zatem kryteria projektowania, są nadal czysto empiryczne. Jak dotąd brak jest dowodów, że szczeliny tworzone w toku szczelinowania ciśnieniem gazów prochowych pozostają otwarte po zwolnieniu ciśnienia, co nie pozwala na uznawanie szczelinowania gazami prochowymi za wiarygodną technikę stymulacji. Zaprojektowanie zabiegu szczelinowania ciśnieniem gazów prochowych dla poprawy chłonności jest natomiast dużo łatwiejsze do wykonania, ponieważ ciśnienie ponownego otwierania szczelin może nie zależeć w znacznym stopniu od wzoru szczelin, jeżeli wielkość szczeliny jest dostatecznie duża w porównaniu do promienia otworu.

Założenia do modelowania

Przedstawiany model szczelinowania ciśnieniem gazów prochowych zbudowany jest na założeniach wymienionych poniżej.

1) Spalanie paliwa prochowego. Zakłada się, że ziarno paliwa posiada osiowy system zapalania, a paliwo

z chwilą zapalenia pali się promieniowo. Przyjmuje się również prostą kinetykę spalania, o liniowej szybkości spalania – będącej funkcją temperatury i ciśnienia.

2) Pęcherz gazowy. Gaz generowany ze spalania paliwa nagazowuje płyn otworowy bez rozpuszczania, tworząc

strefę mieszaniny gazowo-płynowej, którą będzie się nazywać pęcherzem gazowo-płynowym. Pęcherz ten zajmuje cały obszar przekroju otworu i wypiera (na sposób tłoka) sąsiadujący płyn otworowy w górę i w dół z symulowanego interwału.

- 3) Zanedbuje się wpływ wyporności, ponieważ czas narastania ciśnienia jest mały w porównaniu do czasu charakterystycznego, wymaganego do rozproszenia pęcherza i przemieszczenia go w górę wzdłuż otworu.
- 4) Zanedbuje się filtrację z interwału otworu pod ciśnieniem do szkieletu skalnego. Uwzględniana zostaje strata płynu wnikaającego do tworzonych szczelin. Ciśnienie wewnątrz pęcherza i szczelin jest jednorodne.
- 5) Wymiana ciepła pomiędzy gazem a płynem otworowym, która prowadzi do chłodzenia gazu prochowego i jego kurczenia się, nie jest brana pod uwagę.
- 6) Hydraulikę otworu wiertniczego modeluje się, wykorzystując nieliniowe akustyczne przybliżenie dla równań przepływu płynu otworowego przez przewody dla uśrednionego przepływu. Straty cieplego ciśnienia nie są brane pod uwagę.
- 7) Szczelinowanie skały po przełamaniu otworu badane jest z zastosowaniem liniowego modelu sprężystego, sprzęgniętego w prosty sposób z napełnianiem szczeliny przez mieszaninę płynowo-gazową. Inicjowanie szczeliny jest zapoczątkowywane przez przełamanie otworu. Początkowa, dynamiczna faza rozwijania się szczeliny jest przedstawiana jako momentalny „przeskok” szczeliny do jej stanu równowagi. Liczba tworzonych szczelin jest określana z góry. Po początkowym prze-

skoku, któremu towarzyszy spadek ciśnienia wewnątrz pęcherza, propagacja szczeliny kontynuowana jest w reżimie quasi-ustabilizowanym.

Istota tego modelu powiązana jest z następującymi właściwościami:

- sztuczny warunek początkowy dla długości szczeliny, szeroko stosowany w klasycznej teorii szczelinowania hydraulicznego, jest zastąpiony warunkiem przełamania otworu, po którym następuje dynamiczna propagacja szczeliny – aż do uzyskania stanu równowagi,
- faza dynamiczna propagacji szczeliny jest zastąpiona przez natychmiastowy „przeskok szczeliny” do stanu równowagi, odpowiadającego interpretacji spiętrzenia naprężeń krytycznych na jej wierzchołku; rozprężanie się pęcherza w trakcie tej fazy propagacji szczeliny jest zanedbywane; spadek ciśnienia wewnątrz pęcherza, wywoływany przez straty płynu w szczelinach, jest znajdowany z wymagania, że współczynnik intensywności naprężenia jest równy jego krytycznej wartości, określonej przez odporność na kruche pęknięcie,
- wielkość szczeliny otrzymywana na koniec dynamicznej fazy propagacji szczeliny wykorzystywana jest jako naturalny warunek początkowy do modelowania quasi-ustalonej propagacji szczeliny, wymuszanej przez kontynuowane palenie się paliwa po przełamaniu i początkowym przeskoku szczeliny,
- wszystkie trzy procesy: spalanie paliwa, propagacja szczeliny i wypieranie płynu otworowego w górę i w dół od rozszerzającego się pęcherza gazowo-płynowego są razem sprzężone.

Model narastania ciśnienia

Narastanie ciśnienia wewnątrz otworu wiertniczego jest ważnym etapem zabiegu szczelinowania z zastosowaniem generatorów prochowych. Wiąże ono kilka wzajemnie sprzężonych zjawisk: 1) spalanie paliwa prochowego, któremu towarzyszy wytwarzanie gazu, 2) sprężanie mieszaniny płynu otworowego – gazu prochowego oraz 3) rozprzestrzenianie się fali ciśnieniowej wzdłuż otworu. Do przewidywania przełamania otworu, po którym następuje inicjowanie szczeliny i jej propagacja, wymagane jest odpowiednie modelowanie tego zjawiska.

Czas narastania ciśnienia przed przełamaniem otworu i zainicjowaniem powstania szczeliny jest rzędu 5 ms. Całkowity czas spalania paliwa prochowego wynosi około 40 ms [28]. Wzrost ciśnienia w otworze jest ograniczany przez odpływ do szczelin. Po całkowitym zużyciu

paliwa prochowego ciśnienie wgłębne w stymulowanym horyzoncie ulega odprężaniu na skutek: 1) ciągłego przepływu otaczającego płynu otworowego, przyspieszanego w trakcie narastania ciśnienia w górę i w dół względem stymulowanego interwału, oraz 2) filtracji przez powierzchnie tworzonych szczelin. Czas trwania impulsu ciśnienia generowanego w trakcie obróbki jest rzędu 200 ms.

Ponieważ wzór szczelin tworzonych po przełamaniu otworu jest zazwyczaj nieznan, jedynym etapem szczelinowania gazami prochowymi prawdopodobnie możliwym do ilościowego prognozowania jest etap narastania ciśnienia. Modelowanie fazy szczelinowania powinno mieć charakter bardziej jakościowy niż ilościowy, aby zapewnić solidną interpretację zjawiska szczelinowania w trakcie obróbki za pomocą generatora prochowego.

Spalanie paliwa prochowego

Spalanie paliwa prochowego, a tym samym emisja gazów prochowych, jest kontrolowane przez szybkości reakcji chemicznych wiążących się z termochemicznymi przemianami paliwa. Szybkości te bardzo zależą od temperatury, ciśnienia i pola powierzchni paliwa narażonego na działanie wysokiej temperatury. Z kolei pole powierzchni zależy od kształtów cząstek paliwa, ich upakowania i konsolidacji, które zmieniają się w trakcie spalania. Ponadto nadmierne ciśnienie wytworzone na skutek spalania paliwa może powodować pękanie i fragmentację ziaren paliwa, zwiększając pole powierzchni odsłonięte na działanie wysokiej temperatury. Dlatego modelowanie spalania paliwa stanowi w swej naturze raczej skomplikowany problem [18]. Poniżej będzie się postępować według podejścia półempirycznego, opracowanego do zastosowań przemysłowych paliw prochowych, które opiera się na kinetyce liniowego spalania paliwa prochowego [18].

Ziarna paliwa prochowego przeznaczone do stymulacji otworu wiertniczego są zazwyczaj odcinkami walców o promieniowym systemie zapalania. Ten system zapalania tworzony jest np. przez odpalany elektrycznie lont detonujący, przeprowadzony przez środek osiowego kanału w celu utworzenia wysokiej temperatury i fali uderzeniowej na powierzchni ziarna paliwa. Zakładając, że zapłon następuje natychmiastowo, uwzględnimy promieniowe spalanie paliwa prochowego od jego powierzchni wewnętrznej na zewnątrz, zaniebując możliwe zwiększenie zużycia paliwa na skutek pękania i fragmentacji jego ziaren.

Liniowa prędkość spalania dla różnorodnych paliw prochowych stosowanych w pracach przemysłowych jest przedstawiana w postaci:

$$dX/dt = A(T_b)p^n \quad (4)$$

gdzie X jest współrzędną czoła spalania, t jest czasem, A i n są parametrami empirycznymi, zaś T_b to temperatura płomienia. Zazwyczaj n zmienia się w przedziale $0,63 \div 0,95$, natomiast A zależy od wymiarów i wielkości uwzględnionych w równaniu (4). Oba te parametry, A i n , są stabelaryzowane dla większości znanych paliw prochowych [18]. Zazwyczaj przyjmuje się, że temperatura płomienia T_b jest determinowana głównie przez skład chemiczny i właściwości fizyczne paliw (rozkład wielkości cząstek, stopień kompaktacji itp.) i dlatego T_b może być uważane za stałą w modelu spalania paliwa.

W celu uproszczenia analizy zakładamy, że paliwo spala się zupełnie bez pozostałości i dlatego masa generowanego gazu prochowego jest równa masie spalonego paliwa.

Zachowanie się gazu prochowego i płynu otworowego

Zakłada się, że 1) początkowa zawartość gazu w nośniku ziarna paliwa nie jest brana pod uwagę, 2) istnieje idealne połączenie pomiędzy nośnikiem paliwa i otaczającą objętością otworu (warunek podobny do testu wybuchu zamkniętego [18]), 3) wymiana ciepła pomiędzy gazem prochowym, płynem otworowym, osprzętem wgłębnym i otaczającą skałą może być pominięta, oraz 4) ciśnienie w mieszaninie gazu i cieczy jest jednorodne.

Właściwości PVT gazu prochowego są zazwyczaj opisywane równaniem stanu Nobel-Abel (EOS) [18]:

$$p_g(1/\rho_g - c) = RT/m_g \quad (5)$$

gdzie p_g i ρ_g to odpowiednio ciśnienie i gęstość gazu, c to kowolumen, czyli współczynnik poprawkowy – uwzględniający wpływ objętości własnej cząsteczek gazu rzeczywistego na jego objętość właściwą, R jest uniwersalną stałą gazową, T to temperatura, a m_g to średnia masa cząsteczkowa gazu prochowego.

Równanie stanu (5) jest podobne do równania stanu dla gazu idealnego. Dodatkowy parametr, którym jest kowolumen, reprezentuje skuteczną objętość cząsteczkową jednostki masy gazu, która jest równa 4 rzeczywistym objętościom cząsteczek gazu, zgodnie z teorią Van der Waals.

Równanie (5) może być wyrażone w formie równoważnej, która wykorzystuje parametr F , noszący nazwę stałej siły paliwa:

$$p_g(1/\rho_g - c) = F(T/T_b), \quad F = RT_b/m_g \quad (6)$$

Dwa parametry: c i F pojawiające się w równaniu stanu Nobel-Abel (6) są stabelaryzowane dla większości paliw wykorzystywanych w zastosowaniach wojskowych i przemysłowych [18]. Są one zazwyczaj korelowane do maksymalnej gęstości gazu prochowego ρ_{g0} , która jest obserwowana w testach wybuchu zamkniętego i przyjmowana jako 200 kg/m^3 . Ponieważ temperatura T w tych testach równa jest temperaturze spalania paliwa T_b , maksymalna gęstość gazu prochowego ρ_{g0} może być skorelowana do ciśnienia odniesienia p_{g0} , które musi spełniać równanie stanu (6). Daje to następujące równanie dla ciśnienia odniesienia:

$$p_{g0} = F/(\rho_{g0}^{-1} - c)$$

Dlatego też ciśnienie p_{g0} może być uważane za ciśnienie początkowe gazu prochowego, który właśnie został wygenerowany w procesie spalania. Ponieważ ciśnienie w otaczającej objętości, która jest napełniona mieszaniną płynu otworowego i wcześniej wytworzonego gazu, jest niższe niż p_{g0} , wytworzony gaz prochowy musi się rozprężyć.

Zakłada się, że procesy rozprężania i sprężania przebiegają izentropowo (tj. adiabatycznie i odwracalnie), a zależność pomiędzy ciśnieniem gazu p_g i jego objętością Ω_g jest następująca:

$$p_g(\Omega_g - M_g c)^\gamma = const \quad (7)$$

gdzie M_g jest masą gazu, a $\gamma = c_p/c_v$ to stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu c_p i przy stałej objętości c_v , powiązanych ze sobą zależnością termodynamiczną $c_p - c_v = R$.

Nieznana stała w równaniu (7) może być określona z równania:

$$p_g(\Omega_g - M_g c)^\gamma = p_{g0}(\Omega_{g0} - M_g c)^\gamma$$

gdzie Ω_{g0} jest objętością gazu odniesienia, odpowiadającą jego gęstości ρ_{g0} pod ciśnieniem odniesienia p_{g0} .

Typowymi wartościami parametrów, które występują w równaniach opisujących zachowanie się gazu prochowego, są [18]: $c = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $T_b \approx 2500\text{--}3500 \text{ K}$, $m_g \approx 40 \text{ g/mol}$ (np. dla czystego CO_2 : $m_g \approx 44 \text{ g/mol}$). Wprowadzając uniwersalną stałą gazową $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$, można oszacować stałą siły paliwa prochowego: $F \approx 500\text{--}700 \text{ kJ/kg}$. Stosunek ciepła właściwego γ zależy od temperatury, ale dalej stosuje się wartość stałą $\gamma \approx 1,13$. Oszacowanie maksymalnego ciśnienia gazu prochowego, przy zastosowaniu jego maksymalnej gęstości równej $\rho_{g0} = 200 \text{ kg/m}^3$, daje $p_{g0} \approx 118\text{--}165 \text{ MPa}$.

Ścisłość płynu otworowego zależy od jego składu, ciśnienia i temperatury. W przemyśle są znane i szeroko stosowane różne korelacje dla roztworów wodnych i mieszanin węglowodorów. Dla celów tego modelowania zastosowano ogólną zależność wykładniczą na moduł ścisłości:

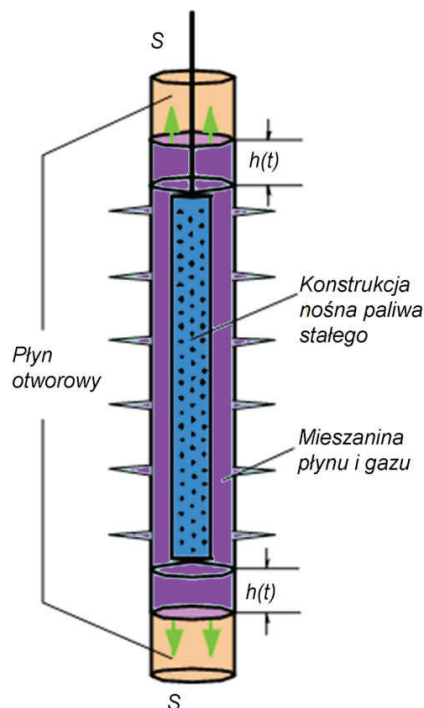
$$K_f(p) = K_{f0} \exp[\alpha(p - p_0)]$$

gdzie K_{f0} jest modulem ścisłości przy ciśnieniu p_0 , a α jest parametrem, który należy określić. To daje następujące wyrażenie na gęstość płynu:

$$\rho_f(p) = \rho_{f0} \exp\left[\frac{1 - e^{-\alpha(p-p_0)}}{\alpha K_{f0}}\right]$$

Model rozprężania się pęcherza

Generowany gaz prochowy nagazowuje płyn otworowy w interwale przeznaczonym do stymulacji, tworząc strefę zawierającą mieszaninę gazowo-płynową, którą będziemy określać nazwą pęcherza. Zwiększenie ciśnienia w tej



Rys. 2. Zwiększanie ciśnienia w otworze i rozprężanie pęcherza gazowego

strefie prowadzi do wypierania płynu otworowego w górę i w dół od pęcherza, w sposób przedstawiony na rysunku 2.

Do modelowania tego zjawiska wykorzystuje się następujące dodatkowe założenia:

- w trakcie mieszania się z płynem otworowym gaz prochowy nie rozpuszcza się w nim,
- czoła górne i dolne pęcherza gazowego wypierają płyn otworowy w trybie tłoka, tj. granice pęcherza są zawsze prostopadłe do osi otworu,
- objętość kanałów perforacyjnych napełnionych płynem otworowym ujęta jest w objętości stymulowanego interwału otworu, tj. w początkowej objętości pęcherza,
- odpływ gazu przez powierzchnie kanałów perforacyjnych jest zaniebawany,
- ciśnienie w pęcherzu gazu oddziałuje na szybkość spalania paliwa prochowego.

Można rozróżnić dwa sprzężone ze sobą procesy:

- 1) zwiększanie ciśnienia w otworze na skutek spalania paliwa prochowego oraz
- 2) rozprzestrzenianie się fali ciśnienia w górę i w dół od pęcherza gazowego.

Dla uproszczenia pomija się wzajemne oddziaływanie fali ciśnieniowej z granicami (tj. z dnem otworu i głowicą otworową), zakładając, że otwór jest nieskończony. To założenie można uzasadnić bardzo krótkim czasem spalania się paliwa prochowego. Jeżeli na przykład prędkość dźwięku na dnie otworu C_F jest rzędu 10^3 m/s , wówczas odległość,

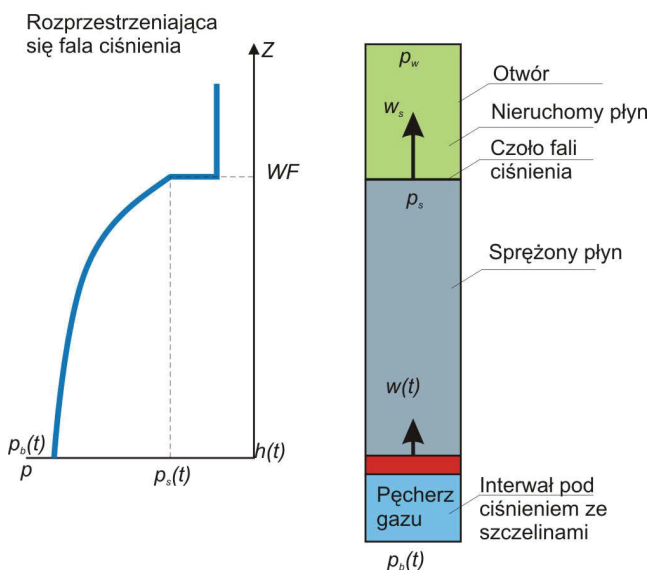
na jaką zachodzi propagacja fali ciśnienia w trakcie spalania paliwa prochowego można oszacować jako $C_F \cdot t_b$, gdzie $t_b = 40$ ms jest całkowitym czasem palenia się paliwa. Daje to odległość rzędu zaledwie 40 m. Zaniedbuje się również zmianę objętości otworu pod oddziaływaniem ciśnienia, ponieważ jest ona bardzo mała w porównaniu do objętości stymulowanego interwału.

Rozprężanie pęcherza gazowego uzależnione jest od generowania gazu prochowego i sprzęgnięte z rozpręstrzenianiem się fali ciśnieniowej wzdłuż otworu, co można opisać według klasycznej teorii 1D przepływu przez przewody [17] w postaci:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_f}{\partial t} + K_f(p_f) \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial p_f}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho_f(p_f)} \frac{\partial p_f}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Tutaj w jest średnią prędkością płynu wzdłuż otworu, ρ_f jest gęstością płynu, $p_f(z,t)$ jest zakłóceniem ciśnienia w odniesieniu do początkowego ciśnienia w otworze p_w , wywołanego przez rozprężanie się pęcherza gazowego, z jest współrzędną wzdłuż otworu. Straty ciśnienia na opory przepływu, jak również zmiana powierzchni przekroju otworu są zaniedbywane.

Problem wypierania płynu otworowego przez rozprężający się pęcherz gazowy jest równoważny problemowi tłoka, przedstawionemu na rysunku 3.



Rys. 3. Rozpręstrzenianie się fali ciśnieniowej wzdłuż otworu, wywołane przez rozprężanie pęcherza gazowego

Problem ten można rozwiązać dla dowolnego reżimu ruchu tłoka, wykorzystując metodę charakterystyk [17].

Rozwiązanie jest podobne do rozwiązania dla zjawiska uderzenia wodnego. Składają się nań dwie strefy: strefa sąsiadująca z pęcherzem o zwiększonym ciśnieniu (fala ciśnieniowa) oraz strefa z nieruchomym płynem otworowym ponad nią (po prawej na rysunku 3). Te strefy są rozdzielone frontem fali ciśnieniowej (FF), przemieszczającym się z lokalną prędkością dźwięku w_s .

Przykład symulacji narastania ciśnienia

Typowy zbiór danych przedstawiono w tabelicy 1.

Parametry, które zmieniano w symulacjach, obejmują stałe kinetyki spalania A i n , temperaturę spalania T_b oraz promień zewnętrzny ziarna paliwa r_c . Pierwsze trzy spośród nich charakteryzują różne typy paliw prochowych stosowanych do szczelinowania gazami prochowymi. Wszystkie inne parametry były traktowane jako stałe. Zaniedbywano objętość nośnika ziaren prochowych. Przyjmuje się, że jest ona mała w porównaniu do objętości otworu wiertniczego i objętości ziarna paliwa prochowego. Długość stymulowanego interwału potraktowano jako początkową wielkość pęcherza. Gęstość strzałów perforacji została wykorzystana do ujęcia objętości kanałów perforacyjnych w objętości otworu.

Typowe parametry narastania ciśnienia uzyskane w symulacjach zaprezentowano w tabelicy 2.

Przełamanie otworu następuje po 3÷5 ms, gdy zużycie paliwa jest rzędu 10÷20% jego początkowej ilości. Prędkość rozprężania się pęcherza gazu wynosi około 20÷30 m/s, tj. jest bardzo mała w porównaniu do prędkości dźwięku w płynie wypełniającym otwór, która jest zazwyczaj rzędu 700÷1000 m/s. Usprawiedliwia to założenia przyjęte powyżej do modelowania propagacji fali ciśnieniowej wzdłuż otworu. Rozprężanie się pęcherza gazu w ciągu 3÷5 ms daje przemieszczenie rzędu 6÷15 cm. Odległość pokonywana przez falę ciśnieniową w trakcie rozprężania się pęcherza gazowego jest rzędu kilku metrów. Z tej przyczyny konieczne jest uwzględnienie wzajemnych oddziaływań pomiędzy falą ciśnieniową i głowicą otworu w trakcie spalania paliwa (co jednak staje się istotne później). W przeciwieństwie do tego wzajemne oddziaływanie fali ciśnieniowej z dnem otworu lub pakierem, zapiętym poniżej interwału podlegającego stymulacji, może być istotne ze względu na możliwość zwiększania szybkości rozprężania się pęcherza gazowego ku górze.

Prędkość rozprężania się pęcherza gazowego jest niemal proporcjonalna do ciśnienia panującego w jego wnętrzu, które jest równe ciśnieniu zewnętrznemu w otaczającym płynie, jako że pozostaje to w zgodności z teorią uderzenia wodnego [17].

Tablica 1. Dane do symulacji narastania ciśnienia

Stała szybkości spalania paliwa prochowego	$A = 5 \cdot 10^{-7} \div 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s} \cdot \text{Pa}^{-n}$
Wykładnik szybkości spalania paliwa prochowego	$n = 0,63 \div 0,95$
Temperatura płomienia	$T_b = 2500 \div 3500 \text{ K}$
Ciśnienie złożowe	$p_w = 20 \text{ MPa}$
Moduł ściśliwości płynu przy 20 MPa	$K_{f0} = 1 \text{ GPa}$
Promień wewnętrzny rur okładzinowych	$r_w = 10 \text{ cm}$
Długość stymulowanego interwału	$L_0 = 12 \text{ m}$
Długość ziarna paliwa prochowego	$h_p = 10 \text{ m}$
Promień zewn. ziarna paliwa prochowego	$r_e = 5/8 \div 1\frac{1}{2}''$
Promień wewn. ziarna paliwa prochowego	$r_i = \frac{1}{4}''$
Gęstość strzałów	$N = 12 \text{ strz./stopę}$
Promień kanału perforacyjnego	$r_p = 1 \text{ cm}$
Długość kanału perforacyjnego	$l_p = 40 \text{ cm}$

Tablica 2. Typowa charakterystyka narastania ciśnienia

Czas palenia się paliwa prochowego	$\sim 10 \div 30 \text{ ms}$
Szybkość narastania ciśnienia	$\sim 1 \div 100 \text{ GPa/s}$
Czas przełamania odwiertu	$\sim 3 \div 5 \text{ ms}$
Zużycie paliwa do chwili przełamania odwiertu	$\sim 10 \div 20\%$
Prędkość rozprężania się pęcherza gazu	$20 \div 30 \text{ m/s}$
Przemieszczenie płynu w otworze	10 cm
Rozprzestrzenianie się fali ciśnieniowej	$5 \div 10 \text{ m}$

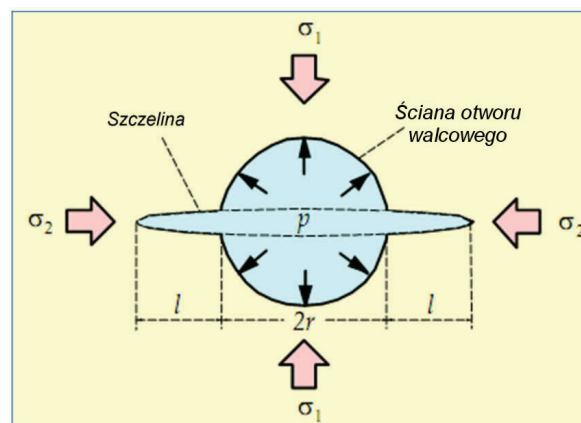
Model szczelinowania ciśnieniem gazów prochowych

Poniżej przedstawiony jest prosty model szczelinowania z wykorzystaniem gazów prochowych. Rozważa się przypadek wysokiej prędkości spalania paliwa prochowego, gdy można zaniedbać filtrację przez perforacje. Pomijana jest również filtracja przez ścianki szczelin. Jedynym uwzględnianym efektem jest utrata płynu przez otwór wiertniczy na skutek jego przechodzenia do rozwijających się szczelin. W ten sposób można oszacować wielkość szczelin tworzonych w trakcie zabiegu szczelinowania gazami prochowymi. Dla uproszczenia zakłada się ponadto, że wypełnianie szczelin przez płyn otworowy pod ciśnieniem następuje natychmiastowo i bez opóźnienia do wierzchołków szczelin.

Quasi-statyczna propagacja szczeliny

Dwuskrzydłowa szczelina KGD [14] pokazana na rysunku 4 może być uznana za prosty model inicjowania szczeliny z niezarurowanego otworu pod ciśnieniem lub od kanału perforacyjnego. Zakłada się również, że jedno

z głównych naprężeń¹ dalekiego pola σ_3 jest skierowane wzdłuż osi otworu, zaś dwa pozostałe, σ_1 i σ_2 , leżą w płaszczyźnie poprzecznej, przy czym minimalne naprężenie główne $\sigma_1 < \sigma_2$ jest prostopadłe do płaszczyzny szczeliny.



Rys. 4. Inicjowanie szczeliny z walcowego otworu

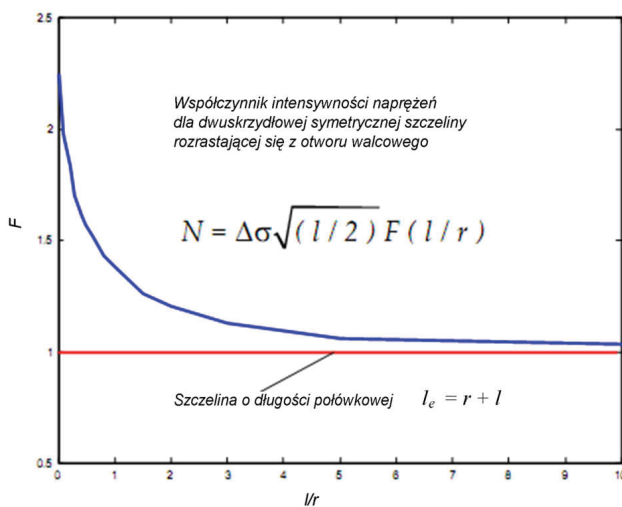
¹ Przyjmuje się, że naprężenia ściskające są dodatnie

Współczynnik intensywności naprężenia dla tej szczeliny $N = x^{1/2} \sigma_N$ jest pokazany na rysunku 5 dla $\sigma_1 = \sigma_2$. Na tym rysunku σ_N jest naprężeniem normalnym w skale w odległości x od wierzchołka szczeliny w płaszczyźnie szczeliny, zaś $\Delta\sigma = p - \sigma_1$ stanowi ciśnienie netto.

Bezwymiarowy współczynnik intensywności naprężenia:

$$G = \sqrt{d} F(d) = \sqrt{\frac{2}{r}} \cdot \frac{N}{\sigma}, \quad d = l/r$$

jest określony w formie wykresu (rysunek 6) we współrzędnych logarytmicznych, gdzie linia prosta \sqrt{d} odpowiada równoważnej szczelinie o długości połówkowej $r + l$ bez otworu w środku.



Rys. 5. Współczynnik intensywności naprężenia dla szczeliny rozrastającej się od walcowego wgłębienia

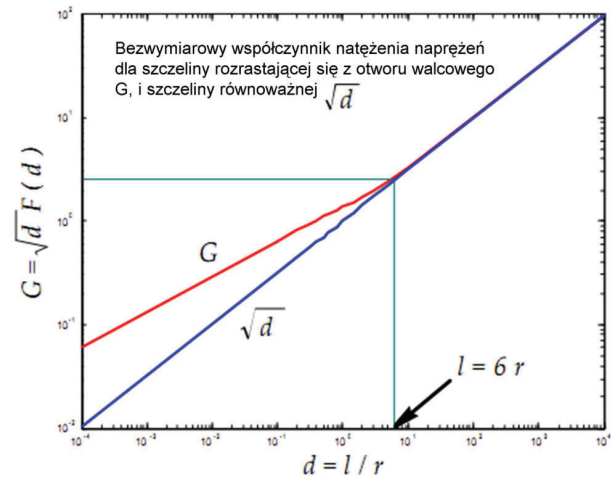
Jasne staje się teraz, że jakakolwiek próba modelowania inicjowania szczeliny z wykorzystaniem podejścia opracowanego w klasycznej teorii szczelinowania hydraulicznego nie może znaleźć zastosowania w przypadku szczelinowania gazami prochowymi, ponieważ im mniejsza jest sztuczna wielkość początkowa szczeliny, tym wyższa nadwyżka ciśnienia odpowiadająca zapoczątkowaniu szczeliny.

Z tego powodu rozważa się sytuację, w której początkowa wielkość szczelin jest równa zero. W tym przypadku

Przykład symulacji

Przykład symulacji szczelinowania z zastosowaniem gazów prochowych obejmującego obie fazy – fazę narastania ciśnienia i fazę rozwijania szczeliny po przełamaniu otworu – przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Obliczenia zostały wykonane dla zbioru danych podanego w tabelicy 1.

Przełamanie otworu następuje 7 ms po zapłonie. Tuż po



Rys. 6. Wpływ obecności otworu na współczynnik intensywności naprężenia

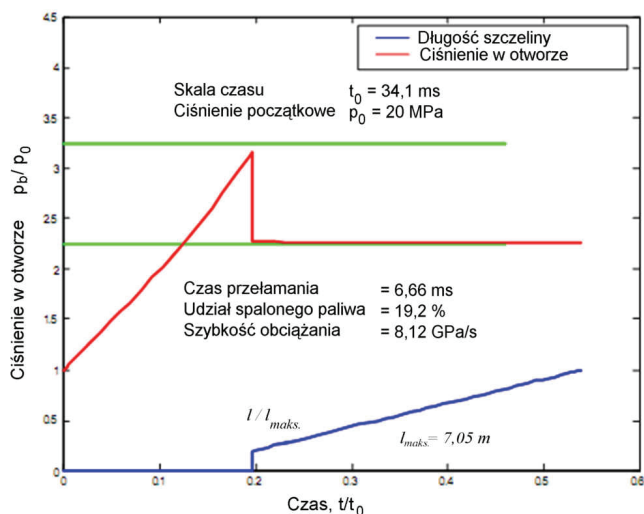
inicjowanie szczeliny rozpoczyna się wtedy, gdy spełniony jest warunek przełamania otworu $p = p_B$, gdzie $\sigma_1 \leq p_B \leq 3\sigma_1 - \sigma_2 - p_0 + \sigma_T$ (gdzie p_0 jest początkowym ciśnieniem w horyzoncie, a σ_T to wytrzymałość skały na rozciąganie).

Dynamiczna faza rozwijania się szczeliny

Po przełamaniu tworzona jest dwuskrzydłowa szczelina KGD, wypełniana natychmiast przez płyn otworowy, sprężony gazem prochowym. Oznacza to, że sztuczny warunek początkowy wykorzystywany w teorii szczelinowania hydraulicznego zastępowany jest przez warunek tworzenia szczeliny. Szczelina, która jest tworzona w momencie przełamania otworu, „przeskakuje” od rozmiaru zerowego do pewnej skończonej wielkości. Ta „naturalna” początkowa wielkość szczeliny określana jest przez wymaganie, że szczelina natychmiast osiąga swój stan równowagi, odpowiadający krytycznemu spiętrzeniu naprężeń u jej wierzchołków. Ten początkowy przeskok szczeliny reprezentuje dynamiczną fazę jej rozwoju i musi mu towarzyszyć rozładowanie ciśnienia wewnątrz interwału o zwiększonym ciśnieniu w otworze, zapobiegające inicjowaniu wielu szczelin.

przełamaniu ciśnienie pęcherza gazowego spada do poziomu, który jest nieco wyższy od minimalnego naprężenia głównego σ_1 i prawie nie zmienia się w trakcie propagacji szczeliny. Długość początkowej szczeliny, utworzonej po przełamaniu, jest rzędu 1,3 m. W trakcie quasi-statycznej fazy rozwijania szczeliny rozrasta się ona liniowo w czasie i osiąga ostatecznie długość około 7 m.

PROPAGACJA SZCELINY PO PRZEŁAMANIU



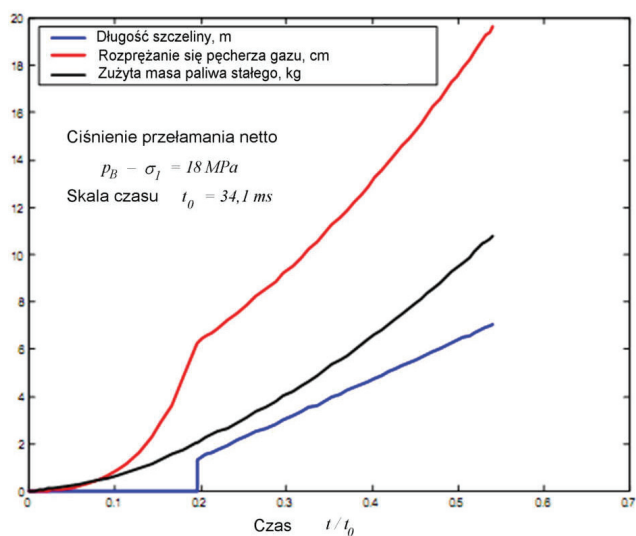
Rys. 7. Długość szczeliny i ciśnienie w pęcherzu gazowym w zależności od czasu, w trakcie fazy narastania ciśnienia i propagacji szczeliny

Szybkość zużywania paliwa wzrasta z czasem, jak pokazano na rysunku 8, na skutek wzrostu ciśnienia pęcherza gazowego w trakcie fazy narastania ciśnienia, jak również wskutek wzrostu pola powierzchni spalania. Rozprężanie się pęcherza gazu również bardzo przyspiesza w trakcie zwiększanie ciśnienia w otworze, a następnie nieco wolniej po przełamaniu otworu. Pionowe przemieszczenie granic pęcherza osiąga 6,5 cm w momencie przełamania otworu i około 20 cm po całkowitym zużyciu paliwa prochowego. Warto zauważyć, że rozprężanie pęcherza po przełamaniu otworu nadal zachodzi przy niemal stałym ciśnieniu wewnątrz pęcherza, tzn. że wzrost ciśnienia w otworze jest

całkowicie kompensowany przez rozprężanie pęcherza i rozrost szczeliny.

Ponieważ w trakcie szczelinowania gazami prochowymi szczelina nie jest podpierana podsadzką, jedynym mechanizmem mogącym zapobiegać całkowitemu zamykaniu się szczeliny jest względne przesunięcie się jej powierzchni pod działaniem różnicy naprężeń głównych. Wówczas naturalna chropowatość powierzchni szczeliny, jak również nieliniowość jej trajektorii, powinna pozostawić przerwę pomiędzy powierzchniami szczeliny po rozładowaniu ciśnienia.

PROPAGACJA SZCELINY I ROZPRĘŻANIE SIĘ PĘCHERZA GAZOWEGO



Rys. 8. Rozprężanie się pęcherza gazowego i zużycie masy paliwa prochowego w trakcie fazy narastania ciśnienia i propagacji szczeliny

Wnioski

1. W artykule przedstawiono podejście do modelowania szczelinowania z zastosowaniem paliw stałych. Wiąże się ono z ilościowym modelowaniem narastania ciśnienia związanym ze spalaniem paliwa oraz jakościowym modelowaniem propagacji szczeliny.
2. Odmienne niż w przypadku modeli konwencjonalnego szczelinowania hydraulicznego, które wymagają warunku początkowej długości szczeliny i nie zajmują się dynamiczną fazą propagacji szczeliny, przedstawione w niniejszym artykule podejście do modelowania inicjowania szczeliny opiera się na warunku przełamania otworu, po którym następuje „przeskok” szczeliny od zera do skończonej długości, reprezentujący dynamiczny rozrost szczeliny.
3. Projektowanie zabiegów szczelinowania z zastosowa-

- niem gazów prochowych zależy od celu wykonywania zabiegu, a kryteria projektowe są różne dla wstępnego szczelinowania i stymulacji produktywności/chłonności.
4. Zabieg wykonywany jako wstępne szczelinowanie wymaga starannego zaprojektowania fazy narastania ciśnienia, dającego gwarancję uzyskania przełamania otworu.
5. Zabieg wykonywany w celu stymulacji musi rozwiązać kwestię zamykania się szczeliny po szczelinowaniu ciśnieniem gazów prochowych. Można to osiągnąć przez utworzenie dużych szczelin przy różnicy naprężeń głównych występujących w skale lub przez ponowne otwieranie szczelin po zabiegu i wprowadzanie podsadzki. Weiskanie podsadzki w szczeliny poprzez ponowne ich otwieranie nie wymaga bardzo

wysokiego ciśnienia pompowania i dlatego może być wykonane bez szczególnie ciężkich urządzeń, które są

niezbędne do konwencjonalnych zabiegów szczelinowania hydraulicznego.

Literatura

- [1] Chen E. P.: *On the Effect of Pulse on Dynamic Rock Fracture*. SAND81-1942, Sandia National Laboratories Report, October 1981.
- [2] Chen E. P.: *Transient Stress Analysis of High Energy Gas Fracture Experiments*. SAND81-0703, Sandia National Laboratories Report, May 1981.
- [3] Chu T. Y., Warpinski N. R., Jacobson R. D.: *In situ experiments of geothermal well stimulation using gas fracturing technology*. SAND87-2241, Sandia National Laboratories Report, 1988.
- [4] Cuderman J. F., Cooper P. W., Chen E. P., Northrop D. A.: *A multiple fracturing technique for enhanced gas recovery*. In Proc. 1981 International Gas Research Conference, Los Angeles, California, 1981, s. 657–666.
- [5] Cuderman J. F., Northrop D. A.: *A Propellant-Based Technology for Multiple Fracturing Wellbores to Enhance Gas Recovery: Application and Results in Devonian Shale*. SPE 12838. In Proc. 1984 SPE / DOE / GRI Unconventional Gas Recovery Symp., Pittsburgh, 13–15 May 1984, s. 77–86.
- [6] Cuderman J. F.: *Design and Modeling of Small Scale Multiple Fracturing Experiments*. SAND81-1398, Sandia National Laboratories Report, December 1981.
- [7] Cuderman J. F.: *High Energy Gas Fracturing Development – Annual Report to Gas Research Institute (April 1981 – March 1982)*. SAND82-0866, Sandia National Laboratories Report, Gas Research Institute Report, GRI 80-0144, April 1982.
- [8] Cuderman J. F.: *High Energy Gas Fracturing Development – Annual Report to Gas Research Institute (April 1982 – March 1983)*. SAND83-0964, Sandia National Laboratories Report, Gas Research Institute Report, GRI 80-0144, June 1983.
- [9] Cuderman J. F.: *High Energy Gas Fracturing Development – Final Report to Gas Research Institute*. SAND84-0247, Sandia National Laboratories Report, Gas Research Institute Report, GRI 84-0090, June 1984.
- [10] Cuderman J. F.: *High Energy Gas Fracturing Development – Quarterly Report to Gas Research Institute (October–December 1982)*. SAND83-0083, Sandia National Laboratories Report, 1982.
- [11] Cuderman J. F.: *High Energy Gas Fracturing Development – Quarterly Report to Gas Research Institute (April – June 1983)*. SAND83-1379, Sandia National Laboratories Report, July 1983.
- [12] Cuderman J. F.: *Multiple fracturing experiments – propellant and borehole considerations*. SPE 10845. In Proc. 1982 SPE/DOE Unconventional Gas Recovery Symp., Pittsburgh, Pennsylvania, 16–18 May 1982, s. 535–546.
- [13] Cuderman J. F.: *Tailored-Pulse Fracturing in Cased and Perforated Boreholes*. SPE 15253. In Proc. SPE Unconventional Gas Technology Symp., Louisville, KY, 18–21 May 1986.
- [14] Economides M. J., Nolte K. G. (Eds.): *Reservoir Stimulation*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, 2000.
- [15] Freund L. B.: *Dynamic Fracture Mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1990.
- [16] Hanson J. M., Schmidt R. A., Cooley C. H., Schatz J. F.: *Multiple Fracture Stimulation Using Controlled Pulse Pressurization*. SPE 12839. In Proc. 1984 SPE/DOE/GRI Unconventional Gas Recovery Symp., Pittsburgh, 13–15 May 1984, s. 87–94.
- [17] Lighthill J.: *Waves in Fluids*. Cambridge, Cambridge University Press, 1978.
- [18] Mniszewski K. R., Napadensky H. S.: *The Characterization of High Energy Chemical Sources for Fracturing of Devonian Shale*. Gas Research Institute Report, GRI-85/0222, September 1985.
- [19] Nilson R. H., Proffer W. J., Duff R. E.: *Modelling of Gas-driven Fractures Induced by Propellant Combustion Within a Borehole*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. 1985, vol. 22, no. 1, s. 3–19.
- [20] Nilson R. H., Proffer W. J.: *Engineering Formulas for Fractures Emanating From Cylindrical and Spherical Holes*. „Journal of Applied Mechanics” 1984, vol. 51, s. 929–933.
- [21] Petitjean L., Couët B.: *Modeling of gas-driven fracture propagation for oil and gas well simulation*. SPE/ISR 28084, Eurock’94, In SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Rotterdam, Balkema 1994, s. 455–463.
- [22] Schatz J. F., Zeigler B. J., Hanson J. M., Christianson M. C., Bellman R. A. Jr.: *Laboratory, Computer Modeling, and Field Studies of the Pulse Fracturing Process*. SPE 18866. In Proc. SPE Prod. Oper. Symp., Oklahoma City, 13–14 March 1989.
- [23] Schmidt R. A., Warpinski N. R., Cooper P. W.: *In situ evaluation of several tailored-pulse well-shooting concepts*. SPE 8934. Proc. 1980 SPE/DOE Symp. On Unconventional Gas Recovery, Pittsburgh, Pennsylvania, 18–21 May 1980, s. 105–116.
- [24] Schmidt R. A., Warpinski N. R., Finley S. J., Sear R. C.: *Multi-Frac. Final Report*. SAND81-1249, Sandia National Laboratories, November 1981.
- [25] Swenson D. V., Taylor L. M.: *Analysis of gas fracture experiments*. SAND82-0633, Sandia National Laboratories Report, July 1982.
- [26] Swift R. P., Kusurov A. S.: *Multiple fracturing of boreholes using tailored-pulse loading*. SPE 9892. In Proc. 1981 SPE/DOE Low Permeability Symp., Denver, Colorado, 27–29 May 1981.
- [27] Warpinski N. R., Schmidt R. A., Cooper P. W., Walling H. C., Northrop D. A.: *High energy gas frac.: multiple fracturing in a wellbore*. In Proc. 20th U.S. Symp. On Rock Mechanics, Austin, 4–6 June 1979, s. 143–152.
- [28] Zazovsky A. F.: *Propellant Fracturing Revisited*. 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS): Rock Mechanics Across Borders and Disciplines, Houston, Texas, 5–9 June 2004.



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.