

**Łukasz Habera\*, Antoni Frodyma\***

## **ZABIEG PERFORACJI OTWORU WIERTNICZEGO JAKO CZYNNIK ODDZIAŁUJĄCY NA WIELKOŚĆ SKIN-EFEKTU**

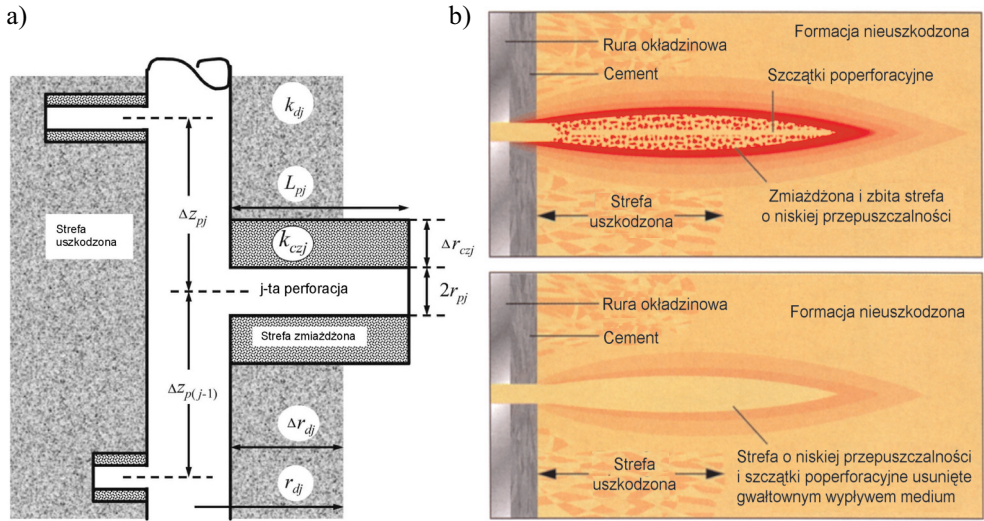
### **1. WPROWADZENIE**

Każdy zarurowany odwiert musi być sperforywany by zapewnić komunikację pomiędzy otworem a skałą zbiornikową (rys. 1). Perforacja sama w sobie jako fizyczna ingerencja w macierz skalną powoduje zaburzenie przepływu płynu generując dodatkowy spadek ciśnienia w odwiercie. Zjawisko to nazwano perforacyjnym współczynnikiem skin-efektu. Konieczność sformułowania współczynnika skin-efektu wynikła z rozbieżności w rzeczywistej ilości eksploatowanego płynu, a wielkościami wyliczonymi na drodze analitycznej, przy założeniu tych samych parametrów. Współczynnik skin-efektu służy zatem jako poprawka na różne zjawiska zachodzące w strefie przyodwiertowej, które pogarszają lub polepszają przewodność hydrauliczną, rzutując tym samym na produktywność (chłonność) odwiertu.

Całkowity współczynnik skin-efektu dla danego odwiertu, to suma algebraiczna poszczególnych pseudoskładników skinu reprezentujących różne przyczyny pogorszenia przepuszczalności. Odwierty ropne i gazowe mogą być otoczone strefą o zmniejszonej przepuszczalności, co jest spowodowane wdzieraniem się płuczki, cementu, osadu płuczki i cząstek stałych w głąb formacji skalnej, powodując dodatkowy spadek ciśnienia. Wpływ tego zjawiska na pogorszenie przepuszczalności formacji skalnej w strefie przyodwiertowej powstały na skutek wiercenia, eksploatacji i operacji stymulujących przepływ nazwano skin-efektem mechanicznym. W skład całościowego współczynnika skin-efektu zalicza się także wpływ geometrii odwiertu, czyli wszelkie odstępstwa od idealnie pionowego otworu (np. odwiert pochyły i poziomy). Również zmiany fazowe płynu złożowego znalazły odzwierciedlenie we współczynniku skinu. W przypadku gdy przepływ wielofazowy wzmaga się w strefie przyotworowej (gdy np. gaz uwalnia się z fazy ciekłej lub gdy z gazu kondensatowego wykrapla się płyn) wówczas wpływ tego zjawiska na produktywność odwiertu wyrażamy poprzez pseudowspółczynnik wielofazowego skin-efektu.

---

\* Zakład Techniki Strzelniczej Instytutu Nafty i Gazu, Kraków



**Rys. 1.** Schemat sperforowanego otworu wiertniczego (a) oraz przekrój kanału perforacyjnego wraz z otaczającą go strefą uszkodzoną spowodowaną pracami wiertniczymi i eksploatacyjnymi (b)

## 2. PARAMETRY PERFORACYJNE WPLYWAJĄCE NA SKIN-EFEKT

Prawidłowe i długoterminowe działanie odwiertu w znacznej mierze zdeternowane jest sposobem sperforowania jego okładziny otworu, czyli odpowiednim dobraniem kluczowych parametrów perforacji. Zasadniczo można wyróżnić trzy grupy parametrów, które w odmienny sposób wpływają na produktywność odwiertu, a tym samym na wielkość skin-efektu:

- 1) parametry geometryczne: głębokość kanału perforacyjnego  $L_p$ , promień kanału perforacyjnego  $r_p$ , odległość pomiędzy perforacjami  $\Delta z$ , kąt fazowania  $\phi$ ;
- 2) parametry charakteryzujące rodzaj udostępnienia złoża: perforacja całego poziomu produkcyjnego, perforacja selektywna, perforacja interwałowa;
- 3) parametry fizyczne wykonania zabiegu: przy podciśnieniu (*underbalance*), oraz przy nadciśnieniu (*overbalance*).

W pracy tej scharakteryzowane zostaną czynniki geometryczne grupy pierwszej.

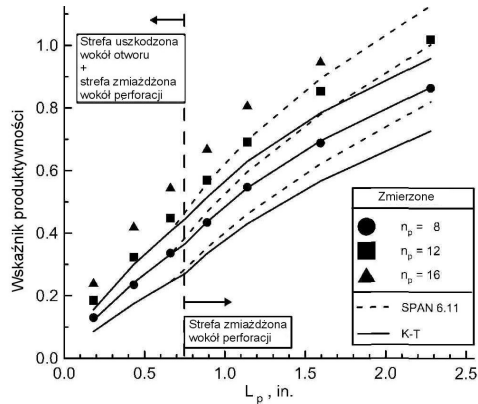
## 3. DŁUGOŚĆ KANAŁU PERFORACYJNEGO

Jednym z istotniejszych celów zabiegu perforacji jest wykonanie dostatecznie długiego, jednorodnego, co do kształtu i wolnego od zanieczyszczeń podetonacyjnych, kanału perforacyjnego.

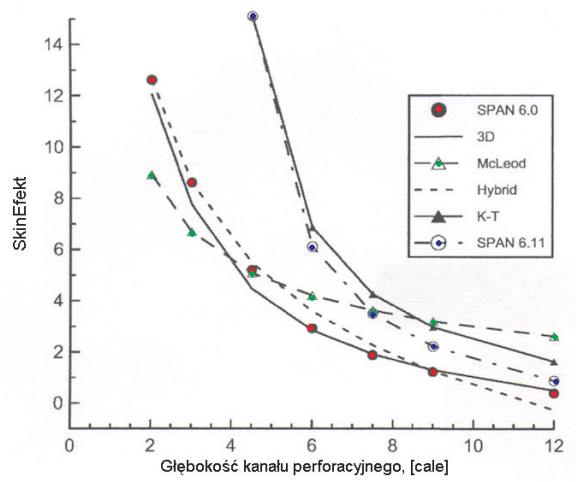
Choć w rzeczywistości trudno jest sprawdzić, jakie powstały otwory perforacyjne w wyniku przeprowadzonego zabiegu, to badania laboratoryjne wykonane na rdzeniach skalnych w warunkach ciśnienia i temperatury odpowiadających warunkom złożowym, jednoznacznie pokazują zależność głębokości kanału perforacyjnego i produktywności odwiertu, co zostało zilustrowane na rysunku 2. Wykres ten przedstawia zestawione dane po-

miarowe, wykazujące zdecydowany wzrost produktywności odwiertu wraz ze wzrastającą głębokością kanału perforacyjnego.

Wykres na rysunku 2 dostarcza również informacji, jak zmienia się produktywność odwiertu wraz ze zmianą liczby wykonanych otworów perforacyjnych na jednostkę długości – odpowiednio 8, 12, 16 strzałów na stopę (24, 36, 48 strzałów na metr). Szerzej o tym zagadnieniu w dalszej części artykułu.



**Rys. 2.** Wpływ głębokości kanału perforacyjnego na produktywność odwiertu.  $n_p$  – liczba strzałów na stopę, odpowiednio 24, 36, 48 strzałów/metr, linia ciągła przedstawia wyniki obliczeń uzyskane metodą zaproponowaną przez Karakas-Tariq (1991), linia przerywana pokazuje wyniki symulacji z wykorzystaniem pakietu SPAN 6.11



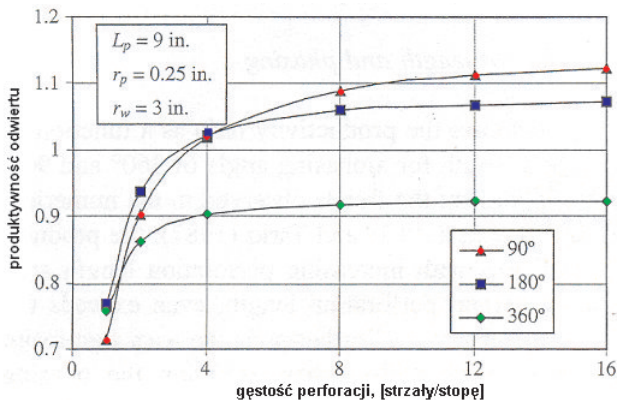
**Rys. 3.** Wpływ głębokości kanału perforacyjnego na skin-efekt

Efektywnie przeprowadzony zabieg perforacji, zapewniający głęboko penetrujące kanały obniża współczynnik skin-efektu. Charakterystykę tego zjawiska obrazuje rysunek 3 przedstawiający zależność bezwymiarowego współczynnika skin-efektu i głębokości kanału

perforacyjnego wyrażonego w calach. Dane zawarte na wykresie przedstawiają wyniki obliczeń skin-efektu za pomocą czterech różnych metod analitycznych (Karakas-Tariq, 3D, McLeod, Hybrid), jak również rezultaty symulacji komputerowej (SPAN 6.0 i SPAN 6.11). Kluczowe założenia w powyższej symulacji to w pełni perforowany horyzont produkcyjny i gęstość perforacji cztery strzały na stopę (12 strzałów na metr).

#### 4. GĘSTOŚĆ ROZMIESZCZENIA OTWORÓW PERFORACYJNYCH

Współczesne konstrukcje perforatorów pozwalają na bardzo różnorodne rozlokowanie ładunków wybuchowych wewnątrz swojego korpusu. Właściwy dobór gęstości strzałów jest bardzo istotny z uwagi na korzyści, jakie może przynieść w postaci intensywnie spenetrowanego horyzontu produkcyjnego, jak również niosących ze sobą zagrożeń choćby w postaci nadmiernego uszkodzenia formacji skalnej. Rysunek 4 ilustruje produktywność odwiertu w funkcji różnej gęstości perforacji. Można zauważyć wyraźną tendencję do zwiększania produktywności odwiertu wraz ze zwiększeniem liczby strzałów na jednostkę długości. Wykres pokazuje, iż przy wykonaniu 1 lub 2 otworów perforacyjnych na stopę (3–6 otworów na metr) skin-efekt jest silnie dodatni i powoduje niską produktywność odwiertu. Przy zwiększeniu ilości perforacji do około 4 kanałów na stopę (12 otworów na metr) produktywność odwiertu równa jest jedności. Oznacza to, że wydatek eksploatawalnego płynu złożowego przy rzeczywistym gradiencie ciśnienia równa się wielkości wyliczonej analitycznie dla tych samych warunków złożowych i geometrii odwiertu. Oznacza to również, że współczynnik skin-efektu wynosi zero. Obserwując poniższy wykres, należy zauważyć, iż dalsze zwiększanie ilości perforacji nie wpływa znacząco na poprawę produktywności odwiertu.



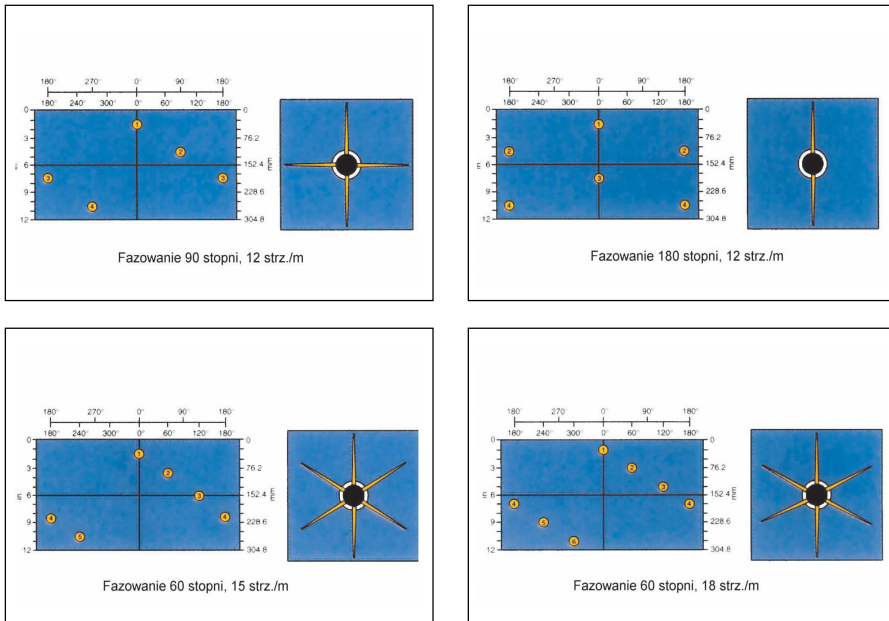
Rys. 4. Produktywność odwiertu w funkcji gęstości strzałów

#### 5. KĄT FAZOWY OTWORÓW PERFORACYJNYCH

Elementem geometrycznym technologii perforacji silnie wpływającym na wielkość skin-efektu jest kąt fazowy rozmieszczenia otworów. Również na rysunku 4 obserwujemy, jak kąt fazowy, czyli przesunięcie między ładunkami kumulacyjnymi wyrażone miarą kąto-

wą, wpływa na produktywność odwiertu. Przy fazowaniu  $360^\circ$  (w literaturze również oznaczane  $0^\circ$ ) otwory perforacyjne znajdują się jeden pod drugim, co skutkuje dużą wartością współczynnika skin-efektu. Znacznie lepsze rezultaty i zmniejszenie współczynnika skin-efektu uzyskuje się przy fazowaniu  $180^\circ$ . Ten rodzaj fazowego rozmieszczenia ładunków pozwala osiągnąć zerową wartość współczynnika skin-efektu i jak pokazuje rysunek 4 możliwe jest uzyskanie produktywności odwiertu przekraczające wartość jedności. Dla rozpatrywanego przypadku dalsze zacieśnienie kąta fazowania do wartości  $90^\circ$  nie przynosi już tak dobrych rezultatów.

Przykładowe konfiguracje geometrycznego rozłożenia ładunków kierunkowych pokazuje rysunek 5.



Rys. 5. kąt fazowy i gęstość rozlokowania ładunków kierunkowych

## 6. PODSUMOWANIE

Współczynnik skin-efektu, odzwierciedlający zmniejszenie przepuszczalności w strefie przyodwiertowej spowodowanej m.in. pracami wiertniczymi i eksploatacyjnymi, jest silnie zależny od sposobu i efektywności zabiegu perforacji odwiertu. Właściwy dobór parametrów geometrycznych perforatora może zapewnić bardzo zadawalające rezultaty w postaci niskiej wartości współczynnika skin-efektu i wysokiej produktywności odwiertu. Wykonanie długich kanałów perforacyjnych sięgających głęboko w formację skalną, odpowiednio rozlokowanych w przesunięciu fazowym, oraz jednorodnie rozmieszczonych wzdłuż całego poziomu produktywnego, sprzyja obniżeniu współczynnika skin-efektu, a tym samym pozytywnie wpływa na ekonomiczną stronę przedsięwzięcia.

## LITERATURA

- [1] Jacques Hagoort: *An Analytical model for predicting the productivity of perforated wells*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 56 (2007),199–218
- [2] Yildiz Turhan: *Assessment of total skin factor in perforated wells*. SPE 82249, przedstawiony na European Formation Damage Conference, The Hague, 13–14 maja 2003
- [3] Behrmann L.A., Pucknell J.K., Bishop S.R., Hsia T.-Y.: *Measurement of Additional Skin Resulting from Perforation Damage*. Paper SPE 22809, przedstawiony na SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, 6–9 października 1991
- [4] Pucknell J.K., Behrmann L.A.: *An Investigation of the Damaged Zone Created by Perforating*. Paper SPE 22811, przedstawiony na SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, 6–9 października 1991
- [5] Frodyma A., Griesgraber K.: *Zjawiska dynamiczne zachodzące we wczesnym okresie perforacji wykonywanej przy podciśnieniu*. Nafta-Gaz, nr 4/2007
- [6] Szostak L., Chrząszcz W.: *Naftowa Inżynieria Złożowa*. Kraków, 2000