

**Jerzy Stopa\*, Paweł Wojnarowski\*, Stanisław Rychlicki\***

## **WYKORZYSTANIE WYNIKÓW SYMULACJI KOMPUTEROWEJ DO OCENY EFEKTYWNOŚCI UDOSTĘPNIENIA ZŁOŻA ROPY NAFTOWEJ ZA POMOCĄ OTWORÓW HORYZONTALNYCH**

### **1. WSTĘP**

W ostatnich latach obserwuje się znaczący wzrost zastosowań otworów horyzontalnych. Główną zaletą otworu horyzontalnego jest istotne zwiększenie powierzchni kontaktu ze złożem, dzięki czemu zwykle uzyskuje się wyraźny przyrost produktywności otworu.

Otwory horyzontalne znajdują zastosowanie w różnych warunkach złożowych i technologicznych [1].

- W przypadku złóż o podwójnej porowatości z naturalnym systemem szczelin. Odwiert horyzontalny może udostępniać partie złoża zawierające systemy szczelin, które w naturalnych warunkach nie kontaktują się ze sobą. Zapewnia to większe wydajność oraz strefę drenażu.
- W przypadku niebezpieczeństwa wystąpienia stożków wodnych i gazowych.
- Na złożach gazu o niskiej przepuszczalności poziomej – odwiert horyzontalny zwiększa obszar drenażu redukując w ten sposób liczbę otworów na złożu.
- Na złożach gazu o wysokiej przepuszczalności – otwory horyzontalne zapewniają niższe prędkości przepływu gazu w strefie przyodwiertowej w porównaniu z odwiertami pionowymi.
- W zaawansowanych metodach wydobycia ropy naftowej – takich jak np. metody termiczne (SAGD, THAI, VAPEX).

W artykule przedstawiono wyniki analizy efektywności zastosowania otworu horyzontalnego na złożu ropy naftowej charakteryzującego się dużą niejednorodnością przepuszczalności. Niejednorodność ta związana jest ze szczelinowym charakterem skały

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

zbiornikowej przy bardzo niskiej przepuszczalności matrycy skalnej. Taki rodzaj skały złożowej stwarza korzystne warunki do zastosowania technologii otworów horyzontalnych. Analizę przeprowadzono w oparciu o symulacje numeryczne z wykorzystaniem programu Eclipse.

## 2. SYMULACJA EKSPLOATACJI ODWIERTEM HORYZONTALNYM

Do określenia efektywności eksploatacji złoża o niskiej przepuszczalności odwiertem horyzontalnym wykorzystano model numeryczny jednego ze złóż ropy naftowej na północy Polski. Jest to złożo niejednorodne, o przepuszczalności do 50 mD, z małymi lokalnymi strefami o przepuszczalności do 460 mD.

W modelu numerycznym, otwór horyzontalny może być reprezentowany przez zbiór segmentów połączonych wzajemnie zgodnie z topologią modelowanego otworu. Dla każdego segmentu definiuje się jego położenie w siatce symulacyjnej oraz połączenia z innymi segmentami. Wyróżniony jest segment główny, zwany pniem (stem) reprezentujący odcinek pionowy, od którego odchodzi odcinek poziomy (branch). Istnieje możliwość zdefiniowania otworu posiadającego kilka odgałęzień (otwór wielodenny). Zarówno pień jak i gałęzie mogą składać się z wielu segmentów, które z kolei mogą być połączone z oczkami siatki symulacyjnej, przez które przechodzą (model perforacji) albo od niego odizolowane (brak perforacji). Każdy z segmentów zawiera wyróżniony punkt, zwany węzłem (node). W trakcie symulacji obliczane są różnice ciśnień między sąsiednimi węzłami, a także między węzłami i oczkami siatki różnicowej, reprezentującymi dynamiczne ciśnienie złożowe. W ten sposób układ węzłów należących do jednej gałęzi tworzy jednowymiarową siatkę różnicową, co umożliwia obliczanie spadków ciśnień w gałęziach i w całym otworze z uwzględnieniem zarówno strat ciśnienia w segmentach jak i aktualnego ciśnienia złożowego. Dla każdego segmentu definiuje się indywidualnie długość, średnicę rury, współczynnik szorstkości oraz określa się czy ma on połączenie ze złożem czy też nie.

Dopływ wielofazowego płynu złożowego do segmentu oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$q_{pj} = T_{wj} M_{pj} (P_j + H_{cj} - P_n - H_{nc}) \quad (1)$$

gdzie:

- $q_{pj}$  – objętościowy wydatek fazy  $p$  do węzła z  $j$ -tego oczka siatki różnicowej (perforacji);
- $T_{wj}$  – współczynnik liczbowy, opisujący przewodność hydrauliczną między złożem i otworem;
- $M_{pj}$  – współczynnik ruchliwości fazy  $p$  w złożu przy  $j$ -tym połączeniu (perforacji) z węzłem;
- $P_j$  – ciśnienie złożowe w bloku siatki różnicowej, zawierającym  $j$ -ty segment;
- $H_{cj}$  – różnica ciśnień hydrostatycznych pomiędzy węzłem oraz środkiem bloku  $j$ -tego siatki różnicowej, zawierającym połączenie (perforację) z węzłem;
- $P_n$  – ciśnienie w segmencie otworu zawierającym węzeł;
- $H_{nc}$  – różnica ciśnień hydrostatycznych wynikająca z różnicy głębokości położenia węzła i połączenia (perforacji).

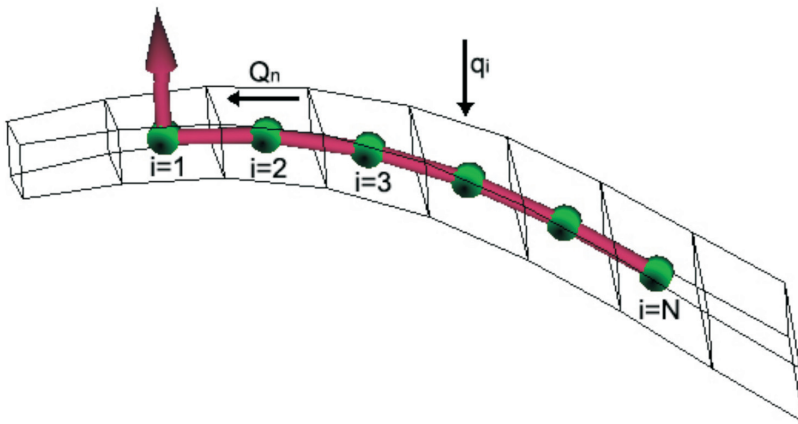
Ponieważ zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 1, w  $n$ -tym segmencie sumują się dopływy z segmentów numerach wyższych, wydajność przepływu przez segment  $n$  w otworze składającym się z  $N$  segmentów wyraża się wzorem:

$$Q_n = \sum_{i=n}^N q_i \quad \text{dla } n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

gdzie:

$Q_n$  – wydajność przepływu przez  $n$ -ty segment,

$q_i$  – wydajność dopływu ze złoża do segmentu (oznaczenia jak na rys. 1).



**Rys. 1.** Lokalizacja segmentów otworu na tle siatki modelu

W przypadku długich odcinków poziomych, istotną rolę zaczynają odgrywać straty ciśnienia związane z tarciami w trakcie przepływu w odcinku poziomym, które w poszczególnych segmentach, określone mogą być w zależności od rodzaju przepływu za pomocą jednego ze znanych z literatury modeli jak: Hagedorna i Browna, Beggsa i Brilla, Mukherjee i Brilla, Graya, Petalasa i Aziza [2].

W najprostszym przypadku przepływu dwufazowego, gradient strat ciśnienia związanych z tarciami określić można z zależności będącej uogólnieniem wzoru dla przepływu jednofazowego [3]:

$$\left( \frac{dP}{dL} \right)_f = \frac{2 \cdot f_{fp} \cdot \rho_m \cdot v_m^2}{D} \quad (3)$$

gdzie:

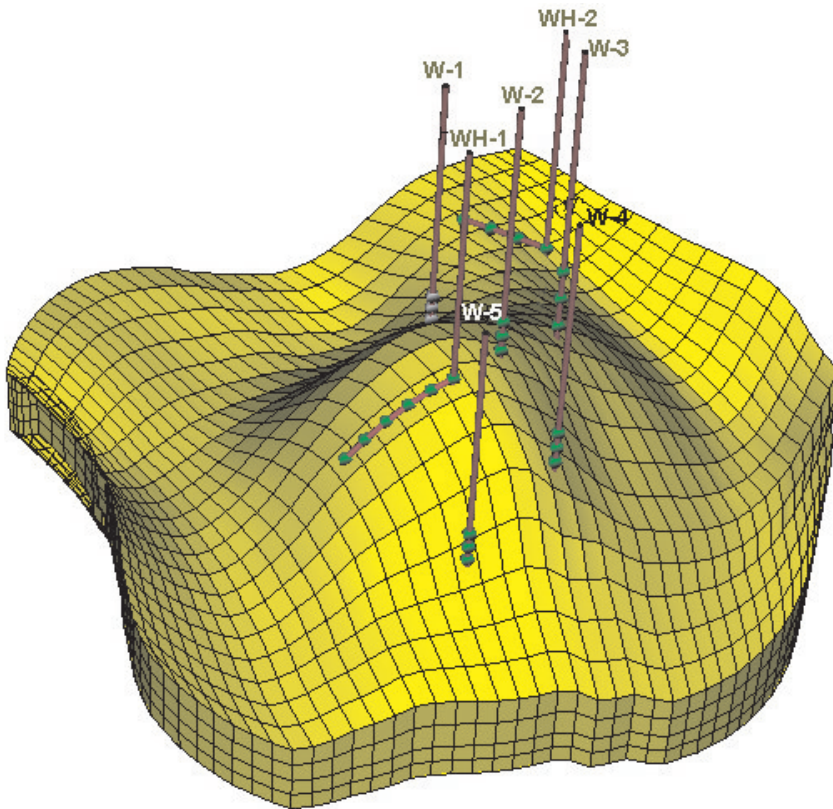
$f_{fp}$  – współczynnik Fanninga strat na tarcie dla przepływu dwufazowego,

$\rho_m$  – gęstość mieszaniny płynu dwufazowego,

$v_m$  – średnia prędkość przepływu mieszaniny.

Własności płynu dwufazowego oraz współczynnik strat na tarcie określa się na podstawie zależności korelacyjnych w zależności od charakteru i prędkości przepływu oraz typu powstałej mieszaniny [1, 3].

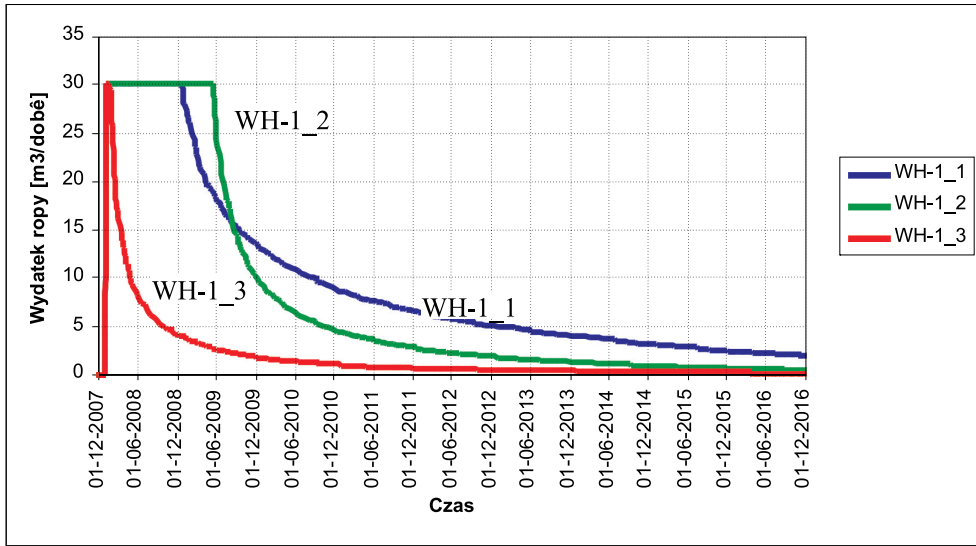
W wykorzystanym do analizy modelu zdefiniowano 5 otworów horyzontalnych w dwóch lokalizacjach na powierzchni złoża. W położeniu pierwszym zlokalizowano otwory WH-1\_1, WH-1\_2 i WH-1\_3, w drugiej lokalizacji WH-2\_1 i WH-2\_2, przy czym poszczególne odcinki poziome w wybranych lokalizacjach udostępniają odizolowane horyzonty złożowe zalegające na różnych głębokościach. Na rysunku 2 przedstawiono geometrię otworów na tle siatki symulacyjnej modelu.



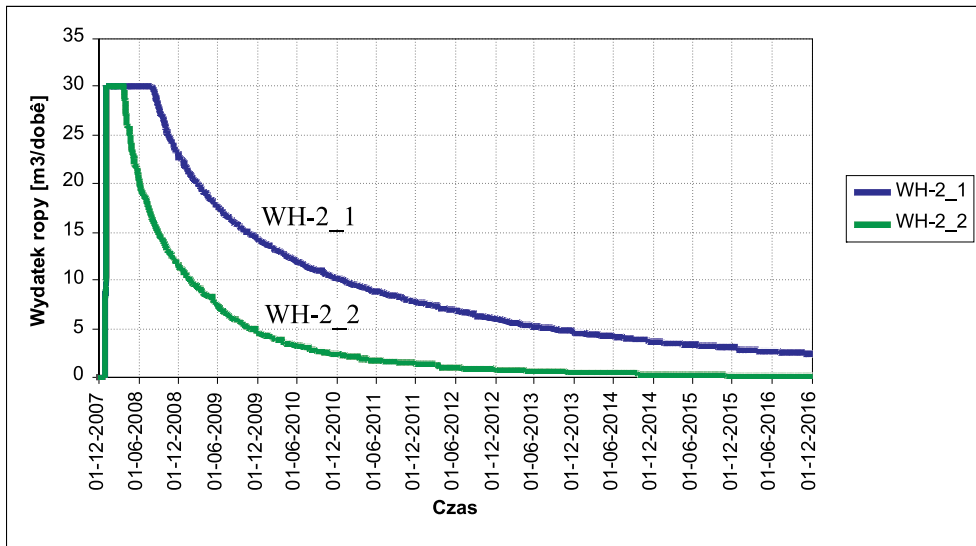
Rys. 2. Geometria otworów na tle siatki symulacyjnej

### 3. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI UDOSTĘPNIENIA ZŁOŻA ODWIERTEM HORYZONTALNYM

W celu określenia efektywności pracy otworów horyzontalnych przyjęto sterowanie wydajnością z ograniczeniem na minimalne ciśnienie denne. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zmiany wydajności w czasie dla modelowanych otworów.



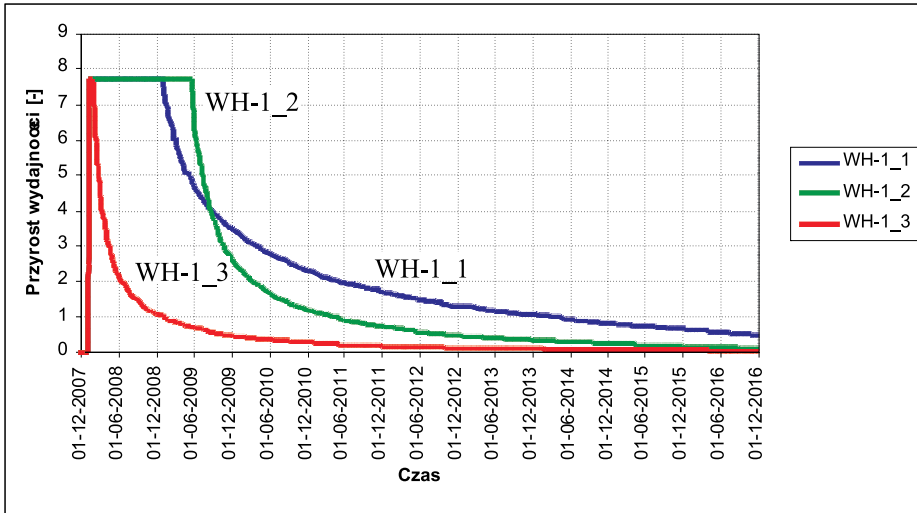
Rys. 3. Zmiany wydajności w czasie w odwiertach WH-1\_1 –WH-1\_3



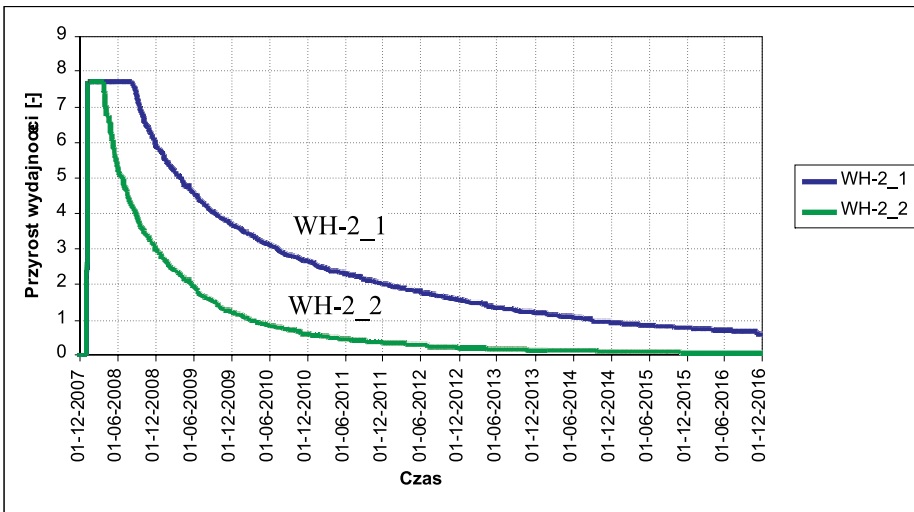
Rys. 4. Zmiany wydajności w czasie w odwiertach WH-2\_1 i WH-2\_2

Jak widać z wykresów (rys. 3, 4), stała wydajność utrzymuje się maksymalnie przez okres 1,5 roku w jednym z otworów. W późniejszym okresie prognozuje się spadek wydajności do 2÷3 [m³/dobę], spowodowany obniżaniem się ciśnienia złożowego. Pomimo spadku wydajności jest to rezultat bardzo dobry, gdyż otwory pionowe obecnie pracują-

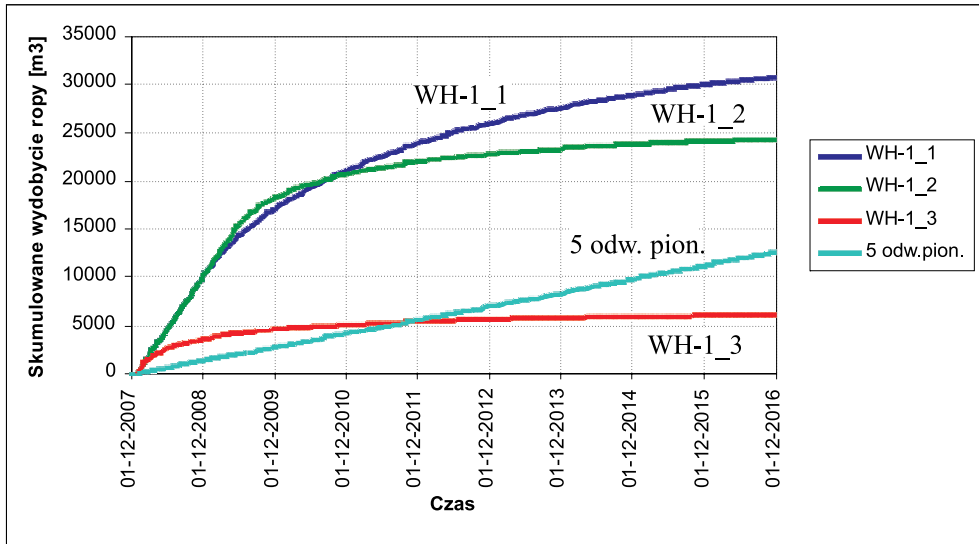
ce na złożu wg raportów kopalnianych, osiągają maksymalne wydajności na poziomie 2 [m<sup>3</sup>/dobe]. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono prognozę względnej wydajności otworów horyzontalnych zdefiniowanej jako iloraz prognozowanej wydajności otworu horyzontalnego do prognozowanej łącznej wydajności z 5 istniejących otworów pionowych. Rysunki 7–10 przedstawiają skumulowane wydobywanie i względne wydobywanie modelowanych otworów.



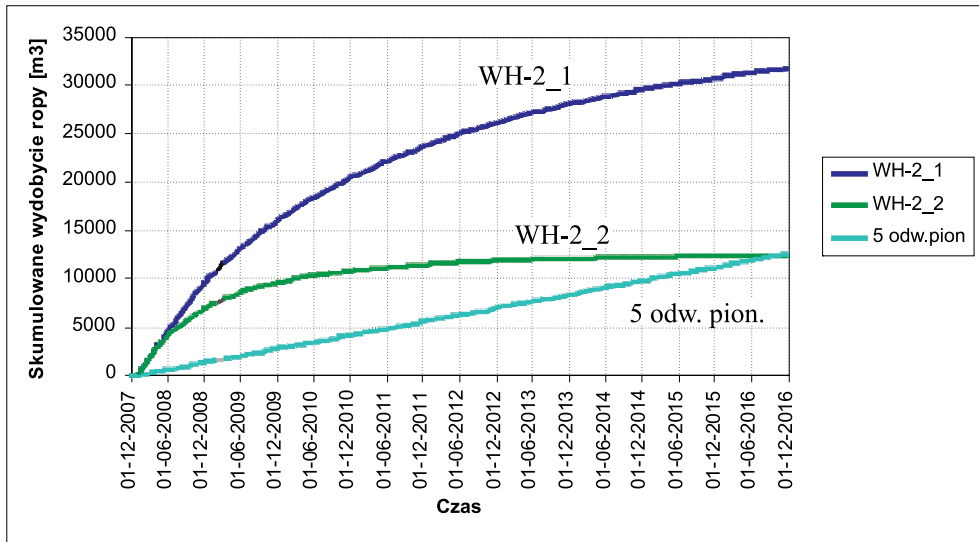
Rys. 5. Względna wydajność otworów horyzontalnych WH-1\_1 –WH-1\_3



Rys. 6. Względna wydajność otworów horyzontalnych WH-2\_1 i WH-2\_2



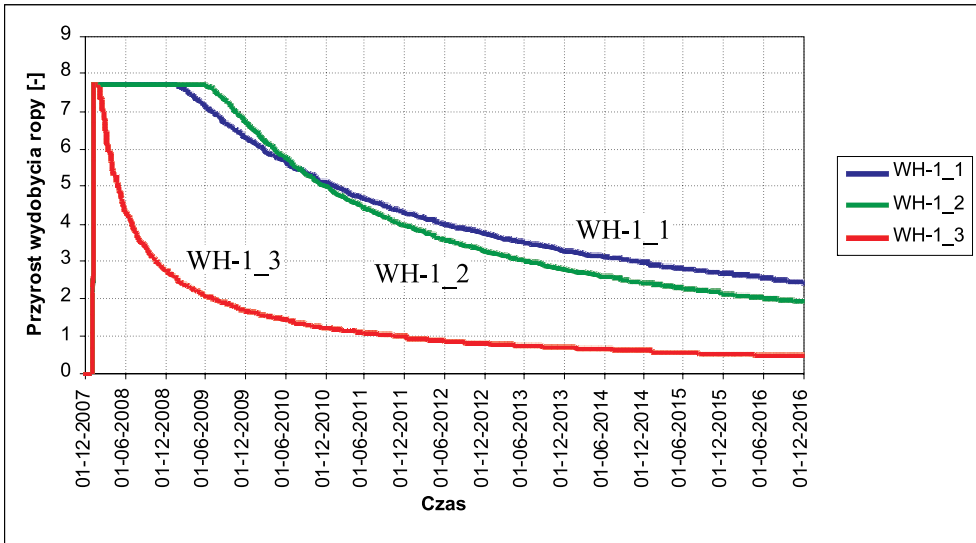
**Rys. 7.** Skumulowane wydobyte z odwiertów horyzontalnych WH-1\_1 –WH-1\_3 oraz łączne wydobyte z odwiertów pionowych



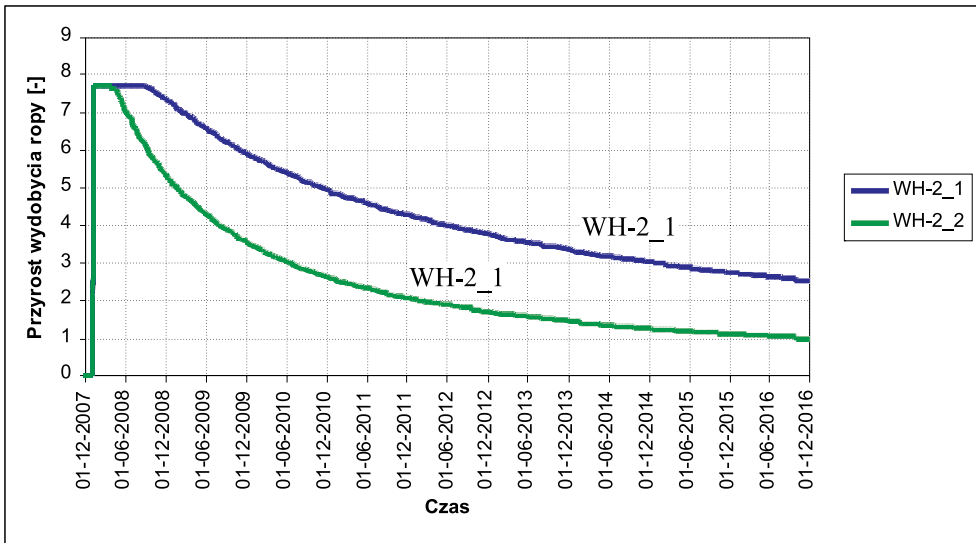
**Rys. 8.** Skumulowane wydobyte z odwiertów horyzontalnych WH-2\_1 i WH-2\_2 oraz łączne wydobyte z odwiertów pionowych

Na rysunku 10 widoczne jest, że w początkowej fazie eksploatacji otwory horyzontalne dają prawie ośmiokrotnie większe wydobyte w porównaniu z otworami pionowymi.

W późniejszym okresie efekt ten maleje, ale w niektórych otworach nadal utrzymuje się wydobywanie na poziomie przekraczającym sumaryczną wydajność z otworów pionowych. Pozwala to zarówno na zwiększenie tempa eksploatacji zasobów, jak i uzyskanie większych współczynników odropienia.



Rys. 9. Względne wydobywanie z otworów horizontalnych WH-1\_1 –WH-1\_3

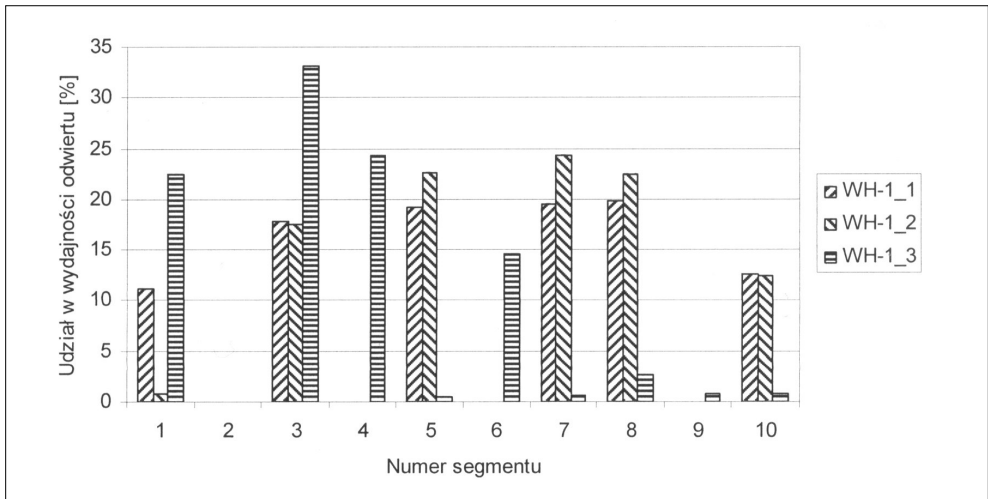


Rys. 10. Względne wydobywanie z otworów horizontalnych WH-2\_1 i WH-2\_2

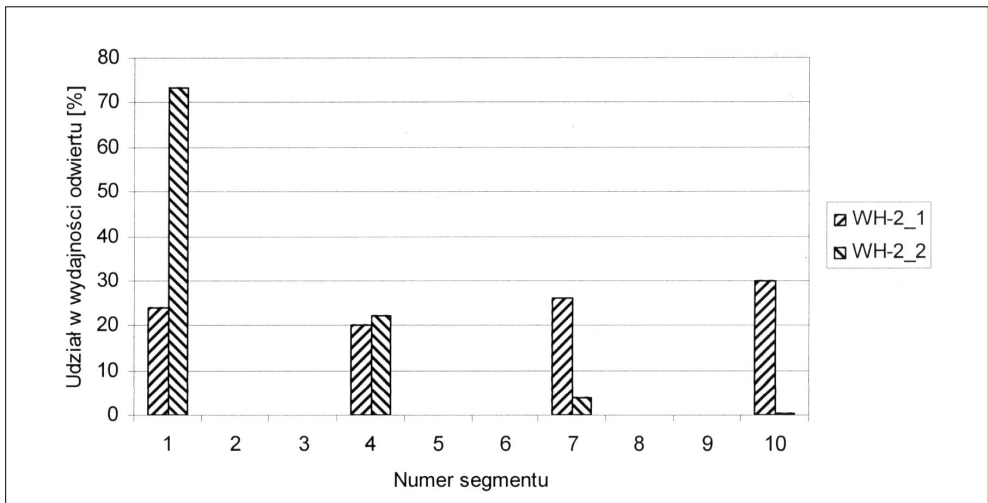


Istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność otworów poziomych jest ich długość. W celu zbadania wpływu tego parametru obliczono wydajności przepływu w poszczególnych segmentach obliczeniowych otworu zgodnie ze wzorami (1) i (2). Zgodnie z rysunkiem 1 numer segmentu jest proporcjonalny do odległości od pnia otworu (długość jednego segmentu obliczeniowego wynosi 50 m.)

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono udział poszczególnych segmentów poziomych odcinków otworów w wydajności otworów horizontalnych.



Rys. 11. Zmiany wydatku przepływu w segmentach otworów horizontalnych WH-1\_1 –WH-1\_3



Rys. 12. Zmiany wydatku przepływu w segmentach otworów horizontalnych WH-2\_1 i WH-2\_2

Na wykresach (rys. 11, 12) widoczna jest znacząca nierównomierność dopływu z poszczególnych segmentów powodowana niejednorodnością złoża. W przypadku wykonania otworów pionowych, najprawdopodobniej część złoża udostępniona w tym przypadku segmentami 4–10 nie zostałaby udostępniona objęta eksploatacją.

Otwory WH-1\_1 i WH-1\_2 pracują w zbliżonych warunkach na całej długości (400 m). Otwór WH-1\_3 natomiast w pierwszej części eksploatuje ze znacznie większą wydajnością niż w odcinku końcowym co sugeruje, że wiercenie tak długiego odcinka poziomego w tym rejonie jest niecelowe. Racjonalna długość tego odgałęzienia wynosi około 250 metrów. W przypadku otworów WH-2\_1 i WH-2\_2 widać wyraźne zróżnicowanie w ich pracy. Również w tym przypadku drugi odwiert produkuje znacznie mniej ropy z końcowej części, a największy dopływ obserwuje się z segmentu pierwszego. Pierwszy odwiert można wykonać w tym przypadku nawet do długości 400 metrów, drugi natomiast powinien być ograniczony do długości około 150 metrów.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie otworów horyzontalnych na złożach o małej przepuszczalności oraz dużej niejednorodności umożliwia wyraźne zwiększenie wydobywania ze złoża, głównie dzięki zwiększeniu strefy objętej eksploatacją. Uzyskanie tego samego rezultatu za pomocą otworów pionowych wymagałoby wykonania rozbudowanej siatki otworów przy niebezpieczeństwie wystąpienia wierceń negatywnych. Z przeprowadzonych symulacji wynika, iż w porównaniu z pięcioma odwiertami pionowymi, zastosowanie otworu horyzontalnego w tym przypadku może umożliwić zarówno znaczne zwiększenie wydajności, jak i ilości wydobytej ropy. Analiza pracy otworów horyzontalnych w przedstawionych warunkach geologicznych z wykorzystaniem symulacji numerycznej umożliwia określenie racjonalnych długości odcinków poziomych otworów, przyczyniając się do redukcji ewentualnych kosztów ich wykonania.

#### LITERATURA

- [1] Brill J.P., Mukherjee H.: *Multiphase Flow in Wells*. AIME SPE, Richardson 1999
- [2] ECLIPSE – Technical Description 2007.1, 2007
- [3] Economides J.M., Hill A.D., Ehlig-Economides Ch.: *Petroleum Production Systems*. New Jersey, Prtence Hall PTR 1994
- [4] Joshi S.D.: *Horizontal well technology*. Tulsa, Penn Well Books 1991