

Wpływ rezydualnego nasycenia gazem poniżej stwierdzonego kontaktu woda–gaz na proces eksploatacji złoża

Impact of residual gas saturation below the specified water-gas contact on the production process

Tomasz Tuczyński^{1,3}, Daniel Podsobiński^{2,3}, Jerzy Stopa³

¹ PGNiG Upstream Norway AS

² PGNiG S.A. Oddział Geologii i Eksploatacji w Warszawie

³ Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

STRESZCZENIE: Złóża gazu ziemnego przez miliony lat poddawane były działaniu rozmaitych czynników geologicznych, które wpływają na ich ostateczny stan i kształt. Zdarza się, że po pewnym czasie produkcji złożo posiada dodatkową energię oraz większe zasoby gazu, niż spodziewano się pierwotnie. Przyczyną tego może być rezydualne nasycenie gazem poniżej wyznaczonego kontaktu woda–gaz, które nie zostało uwzględnione we wcześniejszych analizach. Nieuwzględnienie rezydualnej strefy węglowodorów może prowadzić do błędnych wniosków na temat zasobów, wydobycia ze złoża oraz czasu zawodnienia otworów produkcyjnych. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę wpływu rezydualnej strefy gazowej występującej poniżej konturu woda–gaz na proces produkcji z rzeczywistego złoża gazowo-kondensatowego. Obliczenia zostały wykonane za pomocą dynamicznego modelu złożowego z użyciem komercyjnego symulatora numerycznego Eclipse. Na potrzeby pracy zostało wykonanych 6 modeli dynamicznych, na podstawie których przeprowadzono analizę wpływu na skumulowane wydobycie gazu i wody parametrów takich jak krytyczne nasycenie gazem w strefie rezydualnej oraz objętość warstwy wodonośnej. Na podstawie przedstawionego przykładu wielkość całkowitych zasobów geologicznych po uwzględnieniu strefy rezydualnej wzrosła o około 19%. Oddziaływanie rezydualnej strefy gazowej na wielkość wydobycia gazu nie jest jednak jednoznaczne i jej obecność może wpłynąć zarówno pozytywnie, jak i negatywnie na wielkość wydobycia gazu. Wielkość oraz rodzaj wpływu wynikającego z występowania strefy rezydualnej są bezpośrednio związane z warunkami geologiczno-złożowymi występującymi na danym złożu oraz z samym sposobem prowadzenia eksploatacji. Otrzymane rezultaty wskazują również, że rezydualna strefa gazowa może wpływać na czas zawodnienia otworów produkcyjnych oraz na wielkość wydobycia wody złożowej.

Słowa kluczowe: rezydualna strefa nasycenia gazem, krytyczne nasycenie gazem, dynamiczny model złoża, wodnonaporowy system energetyczny złoża.

ABSTRACT: Natural gas fields over millions of years are exposed to various geological factors that affect their final state and shape. It happens that after some time of production, the reservoir has additional energy and greater gas resources than originally expected. The reason for this may be residual gas saturation below the specified gas–water contact, which has not been included in previous analyzes. Disregarding the residual hydrocarbon zone may lead to erroneous conclusions about resources, recovery factors and water breakthrough time. In this paper the residual gas zone impact on the production process from a real gas-condensate reservoir has been analyzed. The calculations were conducted using a dynamic reservoir model created in Eclipse numerical simulator. For the purpose of the analysis, 6 dynamic models were made. On their basis, an analysis of the impact on cumulative gas and water production was carried out for parameters such as: critical gas saturation in the residual zone and volume of aquifer. Based on the presented example, the overall gas initial in place after taking into account the residual zone has increased about 19%. However, the impact of the residual gas zone on cumulative gas production is not clear-cut and its presence can have a positive as well as negative impact on the cumulative gas production. The size and type of the impact resulting from presence of the residual gas zone is directly related to the geological and reservoir conditions in the given reservoir and the way of production operation. The obtained results indicate also that the residual gas zone may affect the water breakthrough time in production wells as well as total volume of produced water.

Key words: residual gas zone, critical gas saturation, dynamic reservoir model, waterdrive mechanism

Autor do korespondencji: D. Podsobiński, e-mail: daniel.podsobinski@pgnig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 07.05.2020 r. Zatwierdzono do druku: 28.08.2020 r.

Wprowadzenie

Złoża gazu ziemnego przez miliony lat poddawane były działaniu rozmaitych czynników geologicznych wpływających na ich ostateczny stan, który jest stwierdzony otworami poszukiwawczymi, rozpoznawczymi, a na koniec – produkcyjnymi. Zdarza się, że po pewnym czasie produkcji złożo posiada dodatkową energię oraz większe zasoby gazu, niż spodziewano się pierwotnie. Przyczyną tego może być rezydualne nasycenie gazem poniżej wyznaczonego kontaktu woda–gaz, które nie zostało uwzględnione we wcześniejszych analizach. Wiele złóż ze stwierdzonym rezydualnym nasyceniem gazem poniżej kontaktu z wodą znajduje się na Morzu Irlandzkim (Cable et al., 2004).

W niniejszej pracy zbadano wpływ stwierdzonej rezydualnej strefy gazowej występującej poniżej konturu woda–gaz na proces produkcji z rzeczywistego złoża gazowo-kondensatowego. Analizy zostały wykonane za pomocą dynamicznego modelu złożowego z użyciem komercyjnego symulatora numerycznego Eclipse.

Proces powstawania rezydualnego nasycenia gazem i jego mobilizacji

Mechanizm powstawania rezydualnego nasycenia gazem, a następnie jego mobilizację, można podzielić na trzy etapy: drenaż pierwotny, wchłanianie (ang. *imbibition*) oraz drenaż wtórny wraz z ekspansją gazu (Undeland, 2012).

W celu dokładnego zrozumienia tego mechanizmu należy prześledzić od początku proces powstawania złoża gazowego. W warunkach początkowych, gdy złożo w całości nasyczone jest wodą, w pewnym momencie następuje migracja gazu ze skały macierzystej do szczytu struktury skały zbiornikowej. Migrujący gaz stopniowo wypiera wodę z przestrzeni porowej, a na skutek różnicy gęstości następuje grawitacyjny rozdział fazy wodnej i gazowej. W strefie wypełnionej

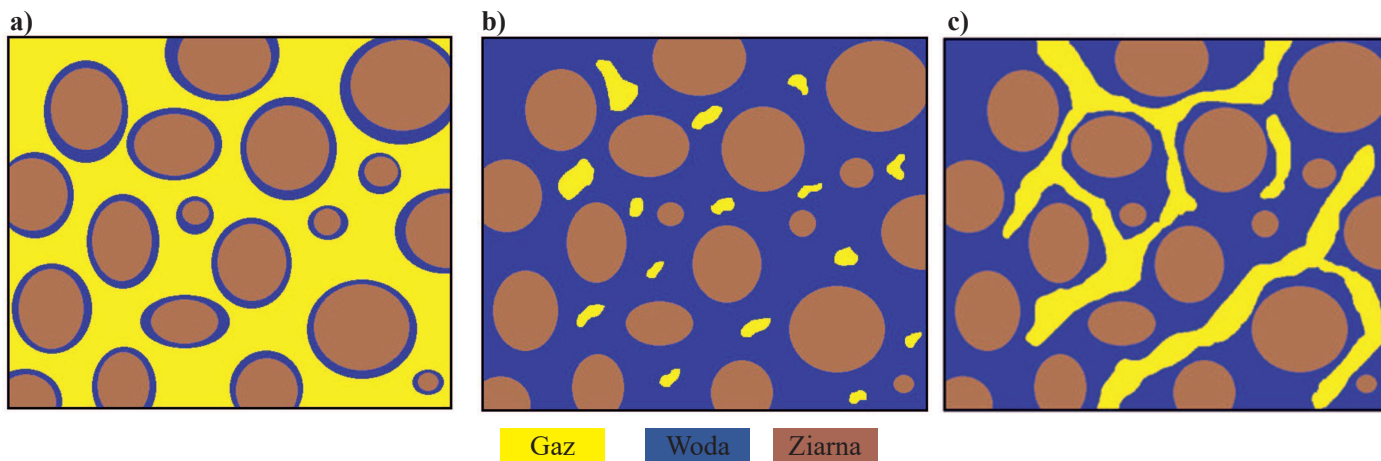
gazem zostaje jedynie niewielka ilość wody, tzw. woda związana, która zwilża hydrofilowe ziarna skały. Proces ten nazywany jest drenażem pierwotnym i przedstawiony jest schematycznie na rysunku 1a.

Następnie, na skutek różnego rodzaju czynników opisanych w dalszej części artykułu, może nastąpić dopływ wody z warstwy wodonośnej do strefy uprzednio wypełnionej gazem. Proces ten nazywany jest wchłanianiem – *imbibition*. Podczas dopływu wody część gazu zostaje uwięziona w przestrzeni porowej i staje się niemobilna. W ten sposób w obszarze, który został ponownie nasycony wodą, powstaje strefa rezydualnego nasycenia gazem (rys. 1b).

W trakcie eksploatacji w złożu dochodzi do obniżania ciśnienia, co powoduje ekspansję pęcherzyków uwięzionego gazu, które stopniowo zwiększają swoją objętość. Nasycenie gazem w przestrzeni porowej wzrasta, aż po pewnym czasie pęcherzyki gazu łączą się ze sobą, tworząc ścieżki migracji, i następuje ponowna mobilizacja fazy gazowej. Proces ten nazywany jest drenażem wtórnym (rys. 1c) (Egermann et al., 2009; Undeland, 2012).

Rodzaje rezydualnej strefy nasycenia gazem

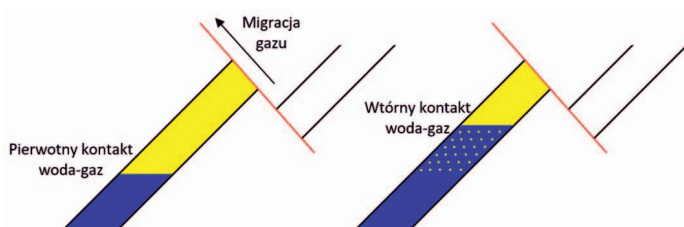
Pochodzenie rezydualnej strefy nasycenia gazem może być antropogeniczne lub paleogeniczne. Antropogeniczna strefa rezydualna powstaje podczas eksploatacji złoża gazowego z aktywną warstwą wodonośną. W miarę spadku ciśnienia na skutek produkcji – następuje proces chłonności wymuszonej (*forced imbibition*), co prowadzi do przemieszczania się wody w kierunku złoża i podnoszenia kontaktu woda–gaz. Dodatkowo dopływająca woda wymusza przepływ dwufazowy w ośrodku porowatym, a tym samym zmniejsza przepuszczalność dla fazy gazowej. Powyżej pewnego nasycenia woda całkowicie blokuje ścieżki migracji dla gazu. Uwięziony gaz staje się niemobilny, dlatego nazywany jest z angielskiego *residual* lub *trapped gas*.



Rys. 1. a) Drenaż pierwotny, b) wchłanianie wody, c) drenaż wtórny

Fig. 1. a) Primary drainage, b) imbibition, c) secondary drainage

Paleogeniczna strefa rezydualnego nasycenia gazem powstaje w przypadku, gdy w utworzonej geologicznie pułapce gazu na skutek różnego rodzaju czynników dochodzi do ustanowienia nowego, płytszego kontaktu woda–gaz. Przyczyną takiego procesu może być wtórna migracja gazu, na przykład na skutek aktywności tektonicznej. Mobilne węglowodory migrujące poza strukturę zastępowane są wodą złożową, co w konsekwencji prowadzi do podnoszenia kontaktu woda–gaz. Część gazu, która pozostała poniżej nowo ustanowionego kontaktu, tworzy rezydualną strefę nasycenia gazem. Taki stan rzeczy obserwowany jest w wielu złożach węglowodorów na całym świecie. W niektórych przypadkach nasycenie węglowodorami poniżej konturu może sięgać nawet do 50%, co może stanowić duży ułamek zasobów geologicznych (Cable et al., 2004). Przykład omawianego procesu przedstawiony jest schematycznie na rysunku 2. Złożem z paleogeniczną strefą rezydualnego nasycenia gazem jest np. złożo Ormen Lange, położone na norweskim szelfie kontynentalnym (Undeland, 2012). Nałożenie kilku czynników, takich jak sposób powstawania struktury, napełnianie pułapki gazem oraz różne etapy występowania anomalnego ciśnienia w basenie, doprowadziło do stopniowego podnoszenia kontaktu i ustanowienia go na obecnym poziomie. Dopływ wody do strefy, gdzie wcześniej znajdował się gaz, spowodował, że poniżej nowo ustanowionego kontaktu część gazu znajdującego się w przestrzeni porowej stała się niemobilna i utworzyła się strefa rezydualnego nasycenia gazem.



Rys. 2. Powstanie paleogenicznej strefy rezydualnego nasycenia gazem

Fig. 2. An illustration of formation of a paleo-residual zone

Wpływ rezydualnego nasycenia gazem na eksploatację

Węglowodory występujące poniżej nowego konturu w początkowych warunkach złożowych, tj. ciśnienia oraz nasyceń, stanowią fazę niemobilną, stąd też często ich obecność jest nieuwzględniana podczas wykonywania analiz złożowych. Należy jednak pamiętać, że wraz ze spadkiem ciśnienia złożowego spowodowanym produkcją w złożu będzie dochodzić do ekspansji węglowodorów, a co za tym idzie – do zmiany nasyceń w przestrzeni porowej. W przypadku gazu ziemnego, którego ściśliwość jest wielokrotnie większa niż ropy naftowej, zmiana nasyceń w przestrzeni porowej może skutkować mobilizacją części uprzednio niemobilnego gazu występującego

poniżej konturu woda–gaz, a tym samym dostarczyć dodatkowej energii oraz potencjalnie zwiększyć wydobyte ze złoża (Cable et al., 2004; Undeland, 2012). W niektórych przypadkach brak uwzględnienia rezydualnej strefy węglowodorów może prowadzić do błędnych wniosków na temat:

- zasobów geologicznych;
- zasobów wydobywalnych;
- wpływu aktywnej warstwy wodonośnej na bilans energetyczny złoża;
- liczby otworów potrzebnych do optymalnego szczypania złoża.

Z uwagi na powyższe – rezydualne nasycenie przestrzeni porowej węglowodorami od lat jest przedmiotem badań wielu naukowców. Odgrywa ono kluczową rolę w oszacowaniu zasobów wydobywalnych, przede wszystkim w złożach z wodno-aporowym systemem energetycznym. Dopływ wody do złoża stanowi ważną przyczynę uwięzienia gazu w ośrodkach wodno-zwilżalnych, a jego ponowna mobilizacja niekiedy jest bardzo trudna do uzyskania. Mobilizacja i produkcja gazu ze strefy rezydualnego nasycenia zależy od rodzaju skały, komunikacji ciśnieniowej oraz natężenia dopływu wody z warstwy wodonośnej (Undeland, 2012).

Kantzas et al. (2000) oraz Ding i Kantzas (2004) w swoich pracach wykazują, że wartość rezydualnego nasycenia gazem nie jest łatwa do oszacowania i zależy od wielu czynników, m. in. właściwości zbiornika oraz płynów złożowych, liczby i rozmiarów porów, rozpuszczalności i ściśliwości gazu. Także sama metodyka przeprowadzania pomiarów oraz przygotowania rdzeni do badania ma znaczny wpływ na uzyskane wyniki i może prowadzić do skrajnie różnych rezultatów (Al-Arfaj et al., 2017). Do wiarygodnego określenia strefy rezydualnej i ilości gazu w niej zgromadzonego niezbędna jest ogromna ilość informacji, takich jak badania sejsmiczne i geofizyczne, pomiary rozkładu ciśnień w formacji, badania laboratoryjne, a przede wszystkim stwierdzenie nasyceń w otworze.

Opis przedmiotu analizy

Analizy zaprezentowane w niniejszej pracy zostały wykonane na złożu X. Złożo X jest gazowo-kondensatową akumulacją utworzoną w obrębie turbidytowych piaskowców kredowych. Skała zbiornikowa charakteryzuje się dobrymi parametrami złożowymi – porowatości mogą dochodzić do 25%, natomiast przepuszczalności do kilkuset mD. Z uwagi na stosunkowo niewielką wysokość kolumny węglowodorów złożo znajduje się głównie w strefie przejściowej, co skutkuje średnim nasyceniem wodą w strefie złożowej na poziomie kilkudziesięciu procent. Na strukturze wykonano kilka otworów poszukiwawczych oraz rozpoznawczych. Na podstawie pomiarów

ciśnien RFT (z ang. *Repeat Formation Test*) został wyznaczony kontur woda–gaz (z ang. *free water level*). Analizy danych geofizycznych z otworów przechodzących przez strefę wodną wykazały, że poniżej zmierzonego konturu woda–gaz znajduje się strefa z rezydualnym nasyceniem gazem. Według pomiarów geofizyki otworowej w strefie rezydualnej występuje nasycenie gazem sięgające do 30%. Powyższe obserwacje wskazują, że w przeszłości złożo posiadało głębszy kontur woda–gaz, a dolna część złoża została zawodniona poprzez napierającą warstwę wodonośną. Z uwagi na wiedzę oraz doświadczenie w rejonie, gdzie znajduje się złożo X, odrzuca się hipotezę o antropogenicznym pochodzeniu strefy rezydualnej. Złożo zagospodarowane jest przy wykorzystaniu horyzontalnych otworów produkcyjnych.

Opis modelu dynamicznego oraz przyjęte założenia

Z uwagi na wymiary geometryczne złoża X model symulacyjny nawet przy zastosowaniu stosunkowo dużego rozmiaru siatki symulacyjnej składał się z blisko 1 miliona komórek, co skutkowało długim czasem obliczeniowym. Po przeprowadzeniu niezbędnych testów zdecydowano o wykorzystaniu modelu *black-oil* zamiast modelu kompozycyjnego, co skutkowało przyspieszeniem procesu obliczeniowego (Fevang et al., 2000). Tym samym do analizy wykorzystano symulator złożowy Eclipse zamiast E300.

Model dynamiczny został zainicjowany nierównowagowo w celu odzwierciedlenia przestrzennej zmienności parametrów PVT stwierdzonej w otworach poszukiwawczych oraz rozpoznawczych. Z uwagi na nierównowagowy sposób inicjowania złoża konieczne było zdefiniowanie w formie tablic reprezentujących każdą komórkę modelu wartości takich parametrów jak: ciśnienie złożowe, nasycenie wodą złożową, nasycenie gazem, R_v lub R_s .

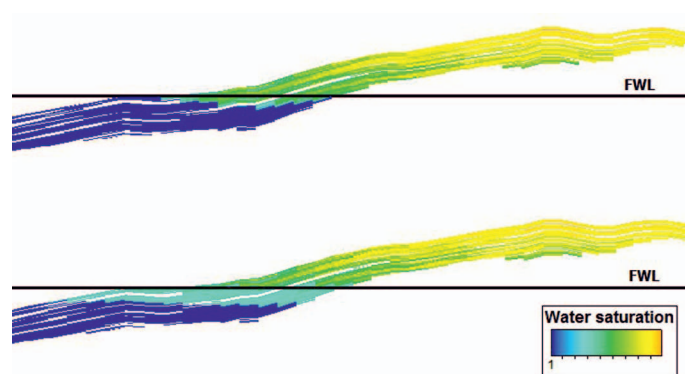
Przepuszczalności fazowe w modelu reprezentowane są przez dwie znormalizowane krzywe przepuszczalności względnych woda–ropa oraz gaz–ropa, wykonane zgodnie z modelem LET (Lomeland, 2018) na podstawie badań laboratoryjnych. Rzeczne krzywe skalowane są w modelu dynamicznym z wykorzystaniem funkcjonalności *end-point scaling* (Petrofaq) w oparciu o wartości następujących parametrów: krytycznego nasycenia gazem, maksymalnego nasycenia gazem, krytycznego nasycenia wodą, minimalnego nasycenia wodą.

Wartości powyższych parametrów zostały opracowane na podstawie badań laboratoryjnych oraz zaimplementowane w formie tablic reprezentujących wartość każdej komórki modelu.

W modelu dynamicznym nie wykorzystano ciśnien kapilarnych z uwagi na fakt, iż początkowe nasycenie wodą złożową zostało zaimplementowane jako parametr wejściowy bezpośrednio z modelu statycznego, gdzie zostało wyznaczone na podstawie danych petrofizycznych.

W literaturze występują modele określające wartość nasycenia gazem w przestrzeni porowej po przejściu frontu wodnego (Suzanne et al., 2001). Wspomniane modele wykorzystują pomiary laboratoryjne i pozwalają na stworzenie zależności pomiędzy jakością skały zbiornikowej oraz rezydualnym nasyceniem gazem (Sgt – *trapped gas saturation*). Należy jednak pamiętać, że zmierzone laboratoryjnie wartości rezydualnego nasycenia gazem są obarczone dużą niepewnością (Suzanne et al., 2001). Dlatego też w poniższym studium zastosowano często wykorzystywaną w praktyce przemysłowej aproksymację, która zakłada, że rezydualne nasycenie gazem po przejściu frontu wodnego wynosi połowę początkowego nasycenia gazem.

W celu określenia wpływu strefy rezydualnej na proces eksploatacji złoża wykonano modele, w których założono występowanie rzeczzonej strefy o stałej miąższości na całej rozciągłości złoża (rys. 3). Powyższe założenie wynika z obserwacji dokonanych w otworach poszukiwawczych oraz rozpoznawczych przechodzących przez warstwę wodonośną.



Rys. 3. Nasycenie wodą złożową w modelu dynamicznym bez uwzględnienia i z uwzględnieniem strefy rezydualnej

Fig. 3. Water saturation in simulation model, with and without paleo-residual zone

Aby zrozumieć wpływ strefy rezydualnej na wielkość wydobycia gazu ze złoża, przeprowadzono analizę wrażliwości z wykorzystaniem następujących parametrów:

- krytycznego nasycenia gazem w strefie rezydualnej;
- objętości warstwy wodonośnej.

Parametry te zostały wytypowane z uwagi na fakt, że mogą mieć bezpośredni wpływ na współczynnik szczyrpania gazu ze strefy rezydualnej.

Na potrzeby analizy wykonano 6 modeli dynamicznych, spośród których 2 nie uwzględniają gazowej strefy rezydualnej, uwzględniają natomiast zmienne założenia dotyczące wielkości warstwy wodonośnej. W pozostałych czterech modelach została zdefiniowana rezydualna strefa nasycona gazem wraz ze zmiennymi założeniami wielkości aquifera oraz krytycznego nasycenia gazem w strefie rezydualnej.

Wyniki modelowania dynamicznego

W celu zbadania wpływu rezydualnej strefy gazowej na proces eksploatacji dokonano porównania modeli z rzeczywistą

strefą względem modeli bez strefy przy konkretnych warunkach złożowo-produkcyjnych. Zmienność parametrów wykorzystanych do stworzenia modeli wraz z rezultatami zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie założeń i rezultatów modeli dynamicznych

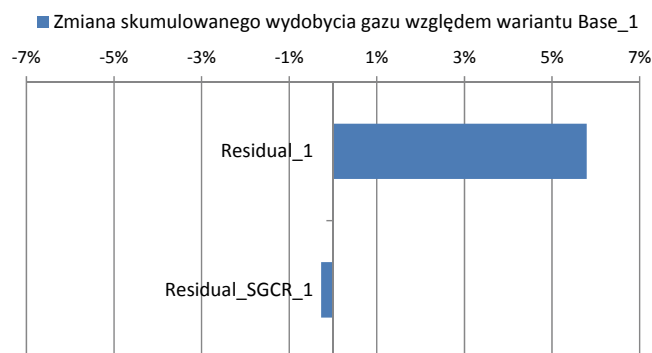
Table 1. Summary of assumptions and results from dynamic models

Model	Parametry wykorzystane w modelach			Rezultaty		
	objętość aquifera	strefa rezydualna poniżej kontaktu gaz-woda	krytyczne nasycenie gazem w strefie rezydualnej	zmiana zasobów geologicznych gazu	zmiana skumulowanego wydobycia gazu	zmiana skumulowanego wydobycia wody złożowej
				[%]		
Base_1	A	nie występuje	N/A	N/A	N/A	N/A
Residual_1	A	występuje	Sgcr = Sgt	19,11	5,79	110,18
Residual_SGCR_1	A	występuje	Sgcr = Sgt + 5%	19,11	0,27	164,63
Base_2	10*A	nie występuje	N/A	N/A	N/A	N/A
Residual_2	10*A	występuje	Sgcr = Sgt	19,11	-4,27	42,31
Residual_SGCR_2	10*A	występuje	Sgcr = Sgt + 5%	19,11	-1,28	55,88

A – początkowa objętość warstwy wodonośnej

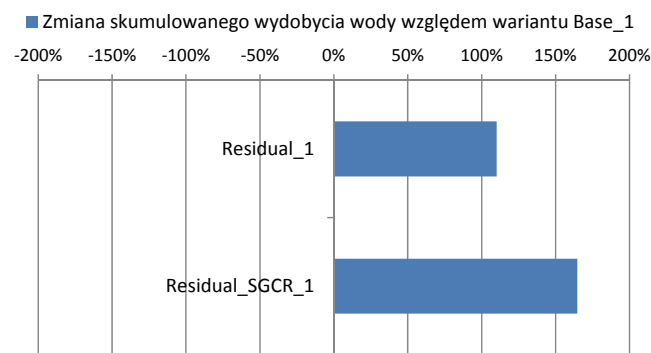
Sgcr – krytyczne nasycenie gazem (najmniejsze nasycenie, przy którym gaz jest mobilny)

Sgt – nasycenie gazem po przejściu frontu wodnego (z ang. *trapped gas saturation*)



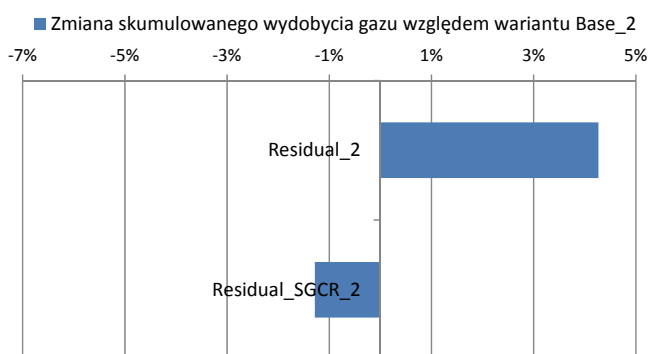
Rys. 4. Zmiana rezultatów symulacji w porównaniu do wariantu Base_1 – wydobycie gazu

Fig. 4. Change of simulation results against Base_1 case – cumulative gas production



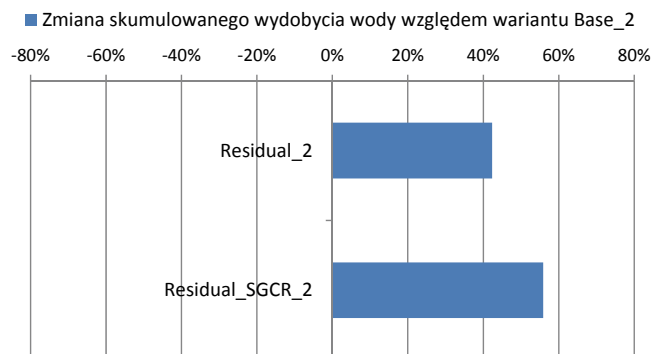
Rys. 5. Zmiana rezultatów symulacji w porównaniu do wariantu Base_1 – wydobycie wody

Fig. 5. Change of simulation results against Base_1 case – cumulative water production



Rys. 6. Zmiana rezultatów symulacji w porównaniu do wariantu Base_2 – wydobycie gazu

Fig. 6. Change of simulation results against Base_2 case – cumulative gas production



Rys. 7. Zmiana rezultatów symulacji w porównaniu do wariantu Base_2 – wydobycie wody

Fig. 7. Change of simulation results against Base_2 case – cumulative water production

1. Po uwzględnieniu w modelu występowania strefy rezydualnej poniżej kontaktu gaz-woda zasoby geologiczne gazu wzrosły o 19,1%.
2. Największy względny wzrost wydobywania, na poziomie 5,8%, występuje, kiedy na złożu nie oddziałuje rozległy i aktywny aquifer oraz $S_{gr} = S_{gt}$ (rys. 4).
3. W przypadku gdy S_{gr} jest większe o 5% w stosunku do S_{gt} , względne wydobywanie gazu jest mniejsze niż w przypadku, kiedy $S_{gr} = S_{gt}$, oraz mniejsze niż w przypadku niezakładania strefy rezydualnej (rys. 4, 6).
4. Uwzględnienie strefy rezydualnej skutkuje zwiększeniem względnego wydobywania wody złożowej we wszystkich analizowanych przypadkach (rys. 5, 7).
5. Występowanie strefy rezydualnej w przypadku, gdy złożo posiada wodnonaporowy system energetyczny oraz $S_{gr} = S_{gt} + 5\%$, może skutkować zmniejszeniem względnego wydobywania gazu (rys. 4, 6).

Dyskusja na temat wyników

W przypadku analizowanego złoża wielkość całkowitych zasobów geologicznych po uwzględnieniu strefy rezydualnej wzrosła o około 19%. Tak duży wzrost wynika z faktu, że złożo ma dużą powierzchnię przy relatywnie niskiej wysokości kolumny węglowodorów. Wielkość wydobywania gazu ze strefy rezydualnej jest uzależniona od występujących warunków złożowo-produkcyjnych. W zależności od wspomnianych warunków strefa rezydualna może wpływać na wzrost lub redukcję wydobywania ze złoża. W przypadku złożów z wodno-naporowym systemem energetycznym wydobywanie gazu ze strefy rezydualnej jest stosunkowo niewielkie. Wynika to z faktu, że w strefie rezydualnej nie dochodzi do znaczącego obniżenia ciśnienia, a tym samym niemobilny gaz nie może się wystarczająco rozprężyć i przekroczyć krytycznego nasycenia gazem umożliwiającą jego dalszy przepływ w stronę otworów produkcyjnych. Ponadto im mniejsza różnica pomiędzy krytycznym nasyceniem gazem a nasyceniem gazem w strefie rezydualnej, tym większy potencjał produkcyjny z rzeczony strefy.

Otrzymane rezultaty wskazują również, że uwzględnienie rezydualnej strefy gazowej powoduje zwiększenie względnego skumulowanego wydobywania wody. W wykonanych modelach taki stan jest spowodowany poprzez dwa czynniki:

- wydłużenie w czasie profilu produkcji złoża;
- wcześniejsze zawodnienie otworów produkcyjnych.

Wydłużenie profilu produkcji związane jest z dodatkową energią złożową pochodzącą ze strefy rezydualnej. Energia ta pozwala na wyprodukowanie większej ilości gazu, czemu towarzyszy wzrost ilości wyprodukowanej wody złożowej.

Ilość dopływającej wody do złoża kontrolowana jest przez następujące czynniki wywołane ekspansją gazu:

- podtrzymanie ciśnienia w strefie rezydualnej;
- redukcję przepuszczalności fazowej wody.

W wykonanych modelach efekt redukcji przepuszczalności względnej wody był niewielki w porównaniu do efektu podtrzymania ciśnienia i nie zdołał ograniczyć dopływu wody ze strefy rezydualnej. Przełożyło się to na wcześniejsze zawodnienie odwiertów i zwiększenie skumulowanego wydobywania wody złożowej. Aby dokładniej zrozumieć to zjawisko i jego wpływ na rezultaty, konieczne byłoby wykonanie analizy wrażliwości z uwzględnieniem przepuszczalności względnej wody przy krytycznym nasyceniu gazem (krw(SGCR)).

W przeprowadzonej analizie nie zostało uwzględnione zjawisko rozpuszczalności gazu w wodzie złożowej, które przy obniżeniu ciśnienia mogłoby skutkować uwolnieniem dodatkowego gazu (Miłek et al., 2013). Takie założenie wynika z faktu, że oszacowana objętość gazu mogącego uwolnić się z wody złożowej w analizowanym przypadku stanowiła tylko 0,12% całkowitych zasobów geologicznych. W związku z tym ilość potencjalnie dodatkowego gazu rozpuszczonego w solance złożowej uznano za zaniedbywalną w analizie zagadnienia gazowej strefy rezydualnej.

Wnioski

Uwzględnienie strefy rezydualnego nasycenia gazem skutkuje wzrostem zasobów geologicznych, w analizowanym przykładzie nawet o 19%, jednak potencjał produkcyjny tego interwału jest mniejszy niż głównej strefy złożowej. W efekcie zwiększone zasoby geologiczne nie przekładają się na proporcjonalny wzrost wydobywania gazu, który w przykładach numerycznych nie przekracza 6%, a w szczególnych przypadkach może być nawet ujemny. Równocześnie obserwuje się zwiększone wydobywanie wody.

Występowanie rezydualnej strefy gazowej może mieć pozytywny bądź negatywny wpływ na wielkość wydobywania gazu. Wielkość oraz rodzaj wpływu wynikającego z obecności strefy rezydualnej są bezpośrednio związane z warunkami geologiczno-złożowymi występującymi w danym złożu oraz z samym sposobem prowadzenia eksploatacji. Skutkuje to koniecznością indywidualnej analizy każdego przypadku w celu podjęcia decyzji czy w obliczeniach inżynierskich konieczne jest uwzględnienie strefy rezydualnej, czy też nie ma ona znaczącego wpływu na wyniki obliczeń. Wpływ strefy rezydualnej na proces produkcji powinien być analizowany zwłaszcza w przypadku złożów, w których strefa ta stanowi znaczną część całkowitych zasobów geologicznych – są to zazwyczaj złoża o dużej powierzchni i relatywnie niskiej wysokości kolumny

węglowodorów. Przy znacznych zasobach gazu w strefie rezydualnej nawet kilkuprocentowy wzrost wydobywania może przełożyć się na spory zysk. W analizie ekonomicznej należy także uwzględnić zwiększenie wydobywania wody złożowej, co jednak w warunkach eksploatacji morskiej zazwyczaj nie stwarza dużego problemu i stanowi niewielki koszt.

Literatura

- Al-Arfaj M., Al-Osail M., Sultan A., 2017. Monitoring imbibition of water into shale pore system: State of the art. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/186904-MS.
- Cable A., Mogford D., Wannell M., 2004. Mobilisation of trapped gas from below the gas-water contact. *International Symposium of the Society of Core Analysts held in Abu Dhabi, UAE, 5-9 October, 2004*.
- Ding M., Kantzas A., 2004. Estimation of residual gas saturation from different reservoirs. *Petroleum Society of Canada*. DOI: 10.2118/2004-061.
- Egermann P., Schaaf T., Brefort B., 2009. A Modified Hysteresis Relative Permeability Including a Gas Remobilization Threshold for Better Production Forecasts of Gas Storages. *International Symposium of the Society of Core Analysts, Noordwijk*. <<https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=23404946>> (dostęp: 01.03.2020).
- Fevang Ø., Singh K., Whitson C.H., 2000. Guidelines for choosing compositional and black-oil models for volatile oil and gas-condensate reservoirs. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/63087-MS.
- Kantzas A., Ding M., Lee J., 2000. Residual Gas Saturation Revisited. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/59782-MS.
- Lomeland F., 2018. Overview of the LET Family of Versatile Correlations for Flow Functions. <https://www.researchgate.net/publication/327514600_Overview_of_the_LET_Family_of_Versatile_Correlations_for_Flow_Functions> (dostęp: 01.03.2020).
- Miłek K., Szott W., Gołąbek A., 2013. Symulacyjne badanie procesów wypierania metanu rozpuszczonego w wodach złożowych

poprzez zatłaczanie gazów kwaśnych w ramach ich sekwestracji. *Nafta-Gaz*, 2: 112–122.

- Petrofaq. Saturation and relative permeability end-points scaling. <http://petrofaq.org/wiki/Saturation_and_relative_permeability_end-points_scaling> (dostęp: 01.03.2020).
- Suzanne K., Hamon G., Billiotte J., Trocmé V., 2001. Distribution of trapped gas saturation in heterogeneous sandstone reservoirs. *International Symposium of the Society of Core Analysts, At -Edinburgh, United Kingdom*.
- Undeland E., 2012. Residual Gas Mobility in Ormen Lange. *Norwegian University of Science and Technology, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics*.



Tomasz TUCZYŃSKI
Inżynier złożowy
PGNiG UPSTREAM NORWAY AS
P.O. BOX 344, 4067 STAVANGER
VESTRE SVANHOLMEN 4, 4313 SANDNES
E-mail: tomasz.tuczynski@pgnig.no



Daniel PODSOBIŃSKI
Inżynier złożowy
PGNiG SA Oddział Geologii i Eksploatacji
w Warszawie
ul. M. Kasprzaka 25
01-224 Warszawa
E-mail: daniel.podsobinski@pgnig.pl



Prof. dr hab. inż. Jerzy STOPA
Profesor zwyczajny
Kierownik Katedry Inżynierii Naftowej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława
Staszica. Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: stopa@agh.edu.pl