



Alicja BYRSKA-RĄPAŁA*

Metodyka i ocena dokładności szacowania zasobów złóż węglowodorów na podstawie analizy krzywych spadku wydobywania

Streszczenie: Dokładność szacowania zasobów złoża węglowodorów wzrasta w miarę, kiedy rośnie ilość i dokładność oszacowania parametrów złożowych. Każda poprawna procedura obliczania zasobów musi uwzględniać ryzyko związane z tego typu procesem. Miarą takiego ryzyka jest błąd szacowania zasobów. Dzisiaj już nikt nie pisze o zasobności złoża jako o stałej, zdeterminowanej liczbie. Uwzględnianie ryzyka w rachunku powoduje, że wielkość zasobów podawana jest nie jako jedna wartość lecz jako pewien przedział wartości lub jako statystyczny rozkład prawdopodobieństwa.

W artykule podjęto próbę sformalizowania sposobu oceny zasobów złóż eksploatowanych, w spadkowej fazie wydobywania oraz obliczania błędów oszacowania zasobów dla tej grupy złóż. Do oszacowania zasobów złoża wykorzystano funkcje statystyczne, a błąd szacowania parametrów funkcji oraz błąd prognozy posłużyły jako kwantyfikacja ryzyka związanego z oceną ilościową zasobów. Metodykę obliczania zasobów oraz ocenę ryzyka takiego oszacowania zilustrowano na przykładzie karpackiego złoża ropy naftowej.

Słowa kluczowe: zasoby złoża węglowodorów, funkcja spadku wydobywania, współczynnik spadku wydobywania, błąd prognozy

Methodology and evaluation of the accuracy of the resource estimate of hydrocarbon deposits on the basis of the decline curves of production analysis

Abstract: The accuracy of estimating hydrocarbon reserves increases as does the extent and precision of applied and calculated reservoir parameter estimates. Each correct procedure for estimating the resource must take the risks associated with the completeness and accuracy of the factors considered into account. The measure of such risk is the error in the estimation of resources. Professionals have already agreed that the size of a deposit is not a constant, determined number but a dynamic estimation. The inclusion of such risk evaluation leads to define a size of resources not as a single value but as a range of ones or as a statistical probability distribution.

* Dr inż., Wydział Zarządzania, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: abyrska@zarz.agh.edu.pl

This article attempts put forward a method for assessing resource deposits exploited in the decreasing phase of extraction and the calculation of errors in the estimation of resources in this group of deposits. Statistical functions were used to estimate the resources of the deposit. The error estimation function parameters and forecast errors were used in order to calculate the risk associated with the estimation of resources. The method for the estimation of resources and risk assessment of such estimations is illustrated by the example of the Carpathian oil fields.

Keywords: deposits of hydrocarbon resources, production decline curve, decline rate, forecast error

Wprowadzenie

Ocena zasobów złoża węglowodorów, jako przedmiot licznych analiz i opracowań, nadal pozostaje tematem, który interesuje geologów, inżynierów naftowych, jak i menadżerów przedsiębiorstw poszukiwawczych. Mimo stosowania coraz nowocześniejszych technik badania skorupy Ziemi, to dokumentowanie złoża i ocena jego zasobności wymaga ogromnego doświadczenia w interpretacji danych geologicznych. Niezbędne jest również doświadczenie w wartościowaniu parametrów charakteryzujących obiekt:

- ciśnienie i temperatura złożowa,
- pojemność zbiornika, którą określa porowatość efektywna oraz rozkład nasycenia węglowodorami i wodą ruchomą,
- charakterystyka fizyczno-chemiczna płynów złożowych zarówno dla warunków powierzchniowych, jak i wglębnych.

Metody szacowania zasobności złoża powinny uwzględniać również fakt, że wielkość uzysku ze złoża, czyli ilość ropy lub/i gazu, która może być ostatecznie wydobyta, zależy nie tylko od parametrów geologicznych, ale również od liczby i rozmieszczenia otworów wiertniczych, sekwencji wiercenia otworów, możliwości wspomaganie mechaniki zbiornika (uwzględnienie wtórnych i trzecich metod intensyfikacji wydobywania) oraz oszacowania, kiedy koszty operacyjne przewyższą przychody i odwiert będzie zamknięty. Każda poprawna procedura obliczeniowa musi uwzględniać ryzyko związane z takim procesem jak estymacja zasobów. Miarą takiego ryzyka jest błąd szacowania. Uwzględnianie ryzyka w rachunku powoduje, że wielkość zasobów bardzo często podawana jest nie jako jedna wartość, lecz jako pewien przedział wartości lub jako statystyczny rozkład prawdopodobieństwa.

Jednym z czynników, który powinien być brany pod uwagę przy okazji wyboru metody oceny zasobności złoża, jest również prostota wymaganych procedur obliczeniowych. Metody oceny zasobów powinny być traktowane jako odpowiednie narzędzie dla inżynierów i geologów praktyków, którzy nie zawsze są ekspertami w takich dziedzinach jak statystyka matematyczna czy informatyka.

Celem szacowania zasobności złoża jest przedstawienie informacji co do wielkości, wiarygodności oszacowania, oceny użyteczności i możliwości zagospodarowania obiektu geologicznego. Takie informacje są niezbędne zarówno dla inwestora do oceny ryzyka nieuzyskania spodziewanego efektu finansowego, jak również dla instytucji finansujących inwestycję do oceny ryzyka inwestycyjnego. Natomiast dla organów administracji państwowej są podstawą polityki surowcowej i oceny stanu zasobów kraju.

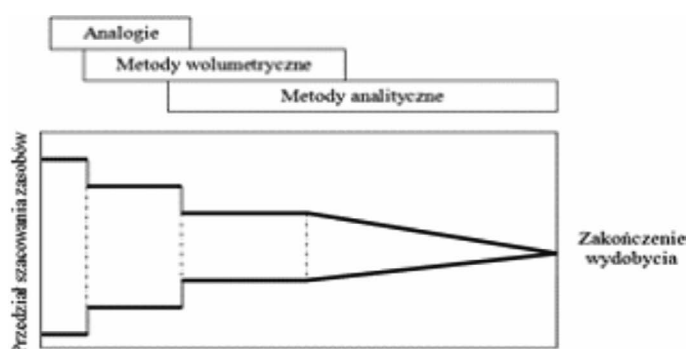
Autorka prezentuje jeden ze sposobów oceny zasobów złóż eksploatowanych, w spadkowej fazie wydobywania oraz obliczania błędów oszacowania zasobów dla tej grupy złóż.

2. Metoda analityczna w ocenie zasobności złoża węglowodorów – funkcje spadku wydajności wydobycia

Metody oceny ilości zasobów złoża można podzielić na trzy podstawowe grupy¹:

- metody oparte na analogiach,
- metody wolumetryczne,
- metody analityczne.

Wybór metody oszacowania zasobności złoża zależy od fazy życia złoża, tzn. czy jest to etap poszukiwań, zagospodarowania czy eksploatacji. Zachodzi przy tym zależność – im dokładniejsze dane wykorzystywane są do obliczeń, tym węższy zakres wartości wynikowych – tę prawidłowość zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Metody oceny zasobności złoża a dokładność oszacowania
Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Assessment methods of the size of the deposit and the accuracy of the estimation

Dla oszacowania zasobności złoża już w spadkowej fazie jego eksploatacji można wykorzystać jeden ze sposobów metody analitycznej – funkcję naturalnego (niespowodowanego zmianami popytowymi) spadku wydobycia w miarę upływu czasu (Byrska-Rapała 2011; Majkrzak 2013; Słupczyński i in. 2009; Wiggins 1992). Jednym z podstawowych parametrów takiej funkcji jest tempo naturalnego spadku wydobycia. W praktyce przyjmuje się jedną z trzech krzywych:

- funkcję spadku wykładniczego,
- funkcję spadku harmonicznego,
- funkcję spadku hiperbolicznego.

W tabeli 1 dla każdej z funkcji naturalnego spadku wydobycia przedstawiono równania wyznaczające czas przerwania eksploatacji złoża ze względów ekonomicznych t_e (gdy wydajność złoża q_t równa się wydajności ekonomicznie opłacalnej q_e) oraz równania umożliwiające wyliczenie zasobów Q , możliwych do wydobycia do momentu przerwania eksploatacji w momencie t_e .

¹ Taki podział jest również rekomendowany przez Petroleum Resources Management System, www.spe.org/spe-site/spe/industry/reserves, dostęp z dnia 17.06.2014.

TABELA 1. Funkcje naturalnego spadku wydobywania

TABLE 1. Production decline curves

Typ funkcji naturalnego spadku wydobywania	Przerwanie eksploatacji ze względów ekonomicznych gdy $q_t = q_e$	Zasoby możliwe do wydobywania
Funkcja wykładnicza $q_t = q_p \cdot e^{-d_w \cdot t}$	$t_{eW} = \frac{1}{d_w} \cdot \ln \frac{q_p}{q_e}$	$Q = \frac{q_p - q_e}{d_w}$
Funkcja harmoniczna $q_t = q_p \cdot (1 + d_H \cdot t)^{-1}$	$t_{eH} = \frac{1}{d_H} \cdot \left(\frac{q_p}{q_e} - 1 \right)$	$Q = \frac{q_p}{d_H} \ln \frac{q_p}{q_e}$
Funkcja hiperboliczna $q_t = q_p \cdot \left(1 + \frac{d_h}{2} \cdot t \right)^{-2}$	$t_{eh} = \frac{1}{d_h} \cdot \left(\sqrt{\frac{q_p}{q_e}} - 1 \right)^2$	$Q = \frac{q_p}{d_h} \left(\sqrt{\frac{q_p}{q_e}} - \sqrt{\frac{q_e}{q_e}} \right)$

gdzie:

- q_t – wydajność złoża w momencie t ,
- q_p – wydajność złoża na początku fazy spadku wydobywania,
- t – czas, ($t = 1 \dots T$, $t = 1$ – rok przyjęty jako początek fazy spadku wydobywania; T – ostatni okres, dla którego dysponujemy wiedzą o wydobywaniu),
- d_w – współczynnik wykładniczego spadku wydobywania
- d_H – współczynnik harmonicznego spadku wydobywania,
- d_h – współczynnik hiperbolicznego spadku wydobywania,
- q_e – końcowa, ekonomicznie uzasadniona, wydajność złoża,
- t_e – czas przerwania eksploatacji ze względów ekonomicznych.

Krzywa wykładnicza jest najczęściej wykorzystywana do modelowania rzeczywistości. Wynika to z faktu, że najlepiej opisuje początkowy okres eksploatacji (który decyduje o rentowności złoża), jest najprostsza do liczenia – można ją policzyć także ręcznie, gdyż odpowiada ona postępowi geometrycznemu, a istotna rozbieżność wydajności pomiędzy spadkiem wykładniczym a innymi funkcjami pojawia się po kilku latach eksploatacji i jest zredukowana rachunkiem dyskontowym w analizach rentowności złoża.

Zgodnie z teorią statystyki matematycznej, współczynnik spadku wydobywania d_w jest zmienną losową, dla której można wyznaczyć przedział ufności. Wyznaczone granice przedziału mogą być wykorzystane do wyznaczenia prognozowanej ilości wydobywania ropy/gazu ziemnego. Drugim sposobem oszacowania zasobów geologicznych złoża jest wykorzystanie błędów prognozowania wydobywania na podstawie oszacowanej funkcji spadku.

1.1. Oszacowanie parametrów funkcji spadku wydobywania – metoda najmniejszych kwadratów

Równanie regresji otrzymane na podstawie próbki statystycznej można najogólniej przedstawić jako (Byrska-Rapała i Kozarkiewicz 2011):

$$\hat{y}_i = a_0 + a_1 x_i + \xi_i \quad (1)$$

$$s(a_0) \quad s(a_1) \quad s(y)$$

gdzie:

- \hat{y}_i – wartości zmiennej zależnej (wyliczane z równania regresji),
- x_i – zaobserwowane wartości zmiennej niezależnej,
- a_0 – oszacowana wartość wyrazu wolnego,
- a_1 – oszacowana wartość współczynnika regresji, określa wpływ zmiennej x na zmienną y ,
- ξ_i – składnik losowy, reprezentujący rozrzut punktów empirycznych wokół prostej regresji,
- $s(a_0)$ – błąd oszacowania wyrazu wolnego, służy do budowy przedziału ufności dla nieznannej wartości wyrazu wolnego dla populacji oraz do weryfikacji jego istotności,
- $s(a_1)$ – błąd oszacowania współczynnika regresji, służy do budowy przedziału ufności dla nieznannej wartości współczynnika regresji dla populacji oraz do weryfikacji jego istotności,
- $s(y)$ – błąd standardowy reszt jest miarą przeciętnej różnicy pomiędzy empirycznymi wartościami zmiennej y_i a poszczególnymi wartościami teoretycznymi \hat{y}_i .

Miarą dopasowania równania regresji do danych empirycznych jest współczynnik korelacji liniowej Pearsona r lub współczynnik determinacji r^2 . Współczynnik korelacji liniowej jest miernikiem siły i kierunku powiązania zmiennych y i x ze sobą. Współczynnik determinacji określa, jaka część zmienności całkowitej zmiennej zależnej y została wyjaśniona przez równanie regresji.

Zależność pomiędzy dwoma zmiennymi może mieć charakter nieliniowy – tak jest w przypadku funkcji opisujących fazę spadkową wydobywania węglowodorów ze złoża. Aby możliwe było zastosowanie metody najmniejszych kwadratów do estymacji parametrów równania regresji, a współczynnik korelacji lub współczynnik determinacji interpretować jako miarę najlepszego dopasowania funkcji do danych empirycznych – należy nieliniowy model przekształcić w model liniowy, dokonać tzw. transformacji liniowej.

Wybór postaci analitycznej równania regresji opiera się na porównaniu współczynników determinacji r^2 , policzonych dla transformacji liniowych – wybieramy model o większym współczynniku determinacji.

Sposobem analizy poprawności modelu regresji jest jego weryfikacja, która obejmuje dwa podstawowe etapy:

- weryfikacja istotności korelacji – sprawdzenie, czy wartość współczynnika korelacji r wyznaczona na podstawie n -elementowej próby upoważnia do stwierdzenia, że istnieje istotne (rzeczywiste) powiązanie pomiędzy zmiennymi y i x w populacji,
- weryfikacja istotności parametrów modelu a_0 i a_1 .

W procesie weryfikacji konieczne jest ustalenie poziomu istotności α , czyli maksymalnego dopuszczalnego błędu oceny szacowanych parametrów. Wybór wartości poziomu istotności

ści zależy od badacza, natury problemu i od tego, jak dokładnie chce on weryfikować swoje przypuszczenia o parametrach modelu a_0 i a_1 .

Drugim pojęciem, nierozdzielnie związanym z procesem weryfikacji i szacowania nieznanych parametrów modelu, jest poziom ufności $1 - \alpha$. Poziom ufności jest prawdopodobieństwem, że nieznaną wartość parametru (dla populacji) znajduje się w wyliczonym przedziale liczbowym. Długość przedziału ufności to różnica pomiędzy wyznaczonymi granicami. Połowa długości tego przedziału nazywana jest bezwzględną precyzją szacunku parametru.

1.2. Przedziały ufności dla parametrów modelu regresji. Błędy prognozowania

Przedział ufności dla parametru a_1 (ze wzoru 1) wyliczany jest jako:

$$P(a_1 - t_{\alpha/2; n-2} \cdot s(a_1) < a_1 < a_1 + t_{\alpha/2; n-2} \cdot s(a_1)) = 1 - \alpha \quad (2)$$

gdzie:

$t_{\alpha/2; n-2}$ – wartość statystyki t -Studenta dla poziomu istotności α i liczby stopni swobody $n - 2$ (odczyt z tablicy statystycznej rozkładu Studenta),
pozostałe oznaczenia jak we wzorze 1.

Wykorzystując model regresji do prognozowania wartości zmiennej zależnej y należy na wstępie obliczyć błędy prognozy, według wzoru:

$$s_{y-\hat{y}_p} = \sqrt{s(y)^2 \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right]} \quad (3)$$

Wówczas przedział ufności dla prognozy zmiennej zależnej y_p można wyznaczyć z równania:

$$P(\hat{y}_p - t_{\alpha/2; n-2} \cdot s_{y-\hat{y}_p} < y_p < \hat{y}_p + t_{\alpha/2; n-2} \cdot s_{y-\hat{y}_p}) = 1 - \alpha \quad (4)$$

gdzie:

x_p – wartość zmiennej niezależnej, dla której wyznaczana jest prognoza zmiennej y ,
 \hat{y}_p – wartość zmiennej zależnej, wyliczona z równania regresji dla $x = x_p$.

Bezwzględna precyzja szacunku zmiennej y dla wartości zmiennej zależnej x_p , nazywana również bezwzględnym średnim błędem prognozy V_b , to wyrażenie:

$$V_b = t_{\alpha/2; n-2} \cdot s_{y-\hat{y}_p} \quad (5)$$

Interpretacja średniego błędu prognozy jest następująca: rzeczywista realizacja zmiennej prognozowanej y_p odchyła się średnio *in plus* bądź *in minus* od wyznaczonej wartości \hat{y}_p o wartość bezwzględną błędu prognozy.

Względny średni błąd prognozy (zwykle w ujęciu procentowym) oblicza się jako:

$$V_w = \frac{V_b}{\hat{y}_p} \cdot 100\% \quad (6)$$

V_w podaje, jaki procent oszacowanej wartości \hat{y}_p stanowi średni błąd prognozy.

2. Ocena zasobów geologicznych złoża węglowodorów na podstawie wykładniczej funkcji spadku wydobywania

Zasoby pozostałe do wydobywania w eksploatowanym złożu wyliczane są jako pole pod funkcją spadku wydobywania. Dla wykładniczej funkcji spadku wydobywania (wzór w tab. 1), zakładając nieograniczony horyzont czasu wydobywania ($t = +\infty$), można obliczyć zasoby wydobywalne prognozowane Q_{wprogn} jako:

$$Q_{wprogn} = \frac{q_p}{q_w} \quad \text{gdziej} \quad \int_{t=0}^{t=\infty} q_p \cdot e^{-d_w \cdot t} \cdot dt = \frac{q_p}{q_w} \quad (7)$$

Zasoby Q_{wprogn} są sumą zasobów wydobytych w okresie wykorzystanym do wyznaczenia funkcji spadku wydobywania Q oraz zasobów pozostałych do wydobywania Q_{prog} , czyli:

$$Q_{wprogn} = Q[\text{zasoby wydobyte w okresie } t \in (1, T)] + Q_{prog} \quad (8)$$

Przy obliczeniu zasobów wydobywalnych pierwotnych Q_{wp} należy uwzględnić wydobywanie od początku eksploatacji, tj. historię wydobywania ze złoża do okresu T . Wtedy:

$$Q_{wp} = Q(\text{historia eksploatacji}) + Q_{prog} \quad (9)$$

Pierwotne zasoby geologiczne Q_{gp} oblicza się jako:

$$Q_{gp} = Q_{wp}/RF \quad (10)$$

gdzie:

RF – współczynnik szczypania zasobów.

2.1. Sposoby oceny błędu szacowania zasobów złoża

Sposób oceny błędu szacowania zasobów złoża wynika z metodyki analizy równania regresji, dla którego zostały oszacowane parametry na podstawie fragmentu rzeczywistości,

czyli n -elementowej próby statystycznej. Do oceny błędów można wykorzystać jeden z dwóch sposobów: analizę statystyczną współczynnika spadku wydobywania lub analizę statystyczną błędów prognozy.

Należy podkreślić, że nie można porównywać wyników otrzymanych tymi dwoma sposobami, gdyż dla każdego z nich stosuje się inny horyzont czasu prognozy.

Sposób I

Błąd szacowania zasobów geologicznych jest konsekwencją błędu szacowania współczynnika spadku wydobywania d_w (tab. 1). Dla wartości granicznych d_w oblicza się zasoby Q_{wprog} , Q_{wp} oraz Q_{gp} . Wtedy zasoby wydobywane pierwotnie – Q_{wp} (lub pierwotne zasoby geologiczne Q_{gp}) można przedstawić jako przedział liczbowy ($d_g < Q_{wp} < g_g$).

Dla tak oszacowanych zasobów błąd bezwzględny wyliczany jest ze wzoru:

$$V_p = \frac{(g_g - d_g)}{2} \quad (11)$$

a błąd względny:

$$V_w = \frac{V_p}{Q_{wp}} \cdot 100\% \quad (12)$$

gdzie:

Q_{wp} – zasoby wyliczone ze wzoru 9.

Sposób II

Błąd szacowania zasobów jest konsekwencją błędu prognozy wydobywania. Statystyczne metody i oprogramowanie komputerowe pozwalają wyznaczyć wartość prognozowaną \hat{q}_t oraz błąd takiej prognozy $S_{q-\hat{q}_t}$.

Etapy takiej analizy są następujące:

- należy ustalić okres, dla którego będzie wyznaczona prognoza wydobywania – T_p ,
- dla kolejnego okresu prognozy ($t = T + 1, T + 2, \dots, T_p$) wyliczenie \hat{q}_t (wzór z tab. 1),
- dla kolejnego okresu prognozy wyliczenie dolnej i górnej granicy wartości prognozowanego wydobywania q_t (wzór 4) oraz błędu prognozy (wzór 3),
- obliczenie zasobów pozostałych do wydobywania Q_{prog} jako sumy kolejnych wartości \hat{q}_t dla okresu prognozy,
- wyliczenie dolnej i górnej granicy wielkości zasobów pozostałych do wydobywania Q_{prog} poprzez zsumowanie dolnych i górnych granic przedziału ufności prognozy,
- wyznaczenie przedziału ufności dla zasobów Q_{prog} według reguły: $P(d_g < Q_{prog} < g_g) = 1 - \alpha$,
- wyliczenie zasobów Q_{wp} lub Q_{gp} (wzory 9 i 10),
- wyliczenie i interpretacja bezwzględnego i względnego średniego błędu prognozy (wzory 11 i 12).

3. Analiza przypadku – szacowanie zasobów złoża ropy naftowej

Analizę obliczania zasobów zilustrowano dla złoża ropy naftowej Xk². Złoże to położone jest w jednostce śląskiej polskich Karpat zewnętrznych. Kolektorem ropy naftowej są piaskowce lgockie, których porowatość jest zróżnicowana i wynosi od 5 do 15%, przepuszczalność – od kilku do kilkudziesięciu mD. Złoże jest złożem wielohoryzontowym o bardzo dużej zmienności facjalnej poszczególnych horyzontów. Poszczególne horyzonty wykazują brak ciągłości nawet w sąsiadujących ze sobą otworach. Większość otworów odwiercana była systemem udarowym, bez badań geofizycznych. Piaskowce budujące horyzonty ropne są drobnoziarniste, zbite i twarde o niskich wartościach parametrów zbiornikowych. Porowatość piaskowców dolnokredowych zmienia się od 2,8 do 23%, a przepuszczalność od 0 do 290 mD (Barbacki 1993; Augustyn 2000).

Złoże Xk okryte zostało pod koniec XIX wieku i udostępnione ponad 200 odwiertami, z których obecnie w eksploatacji pozostało 80 otworów. Elementy tektoniczne złoża zostały zgrupowane w sześć bloków produktywnych. Brak możliwości określenia miąższości poziomów, zmienna porowatość i przepuszczalność warstw dolnokredowych oraz brak informacji dotyczącej pierwotnego i obecnego ciśnienia złożowego uniemożliwiają oszacowanie zasobów metodą objętościową. Dlatego też jedyną metodą szacowania zasobów pozostaje metoda oparta na analizie krzywych spadku wydobywania w czasie (Dudek 1998; Pałkowska 1996; Tatar 1954).

3.1. Metodyka szacowania zasobów dla złoża Xk

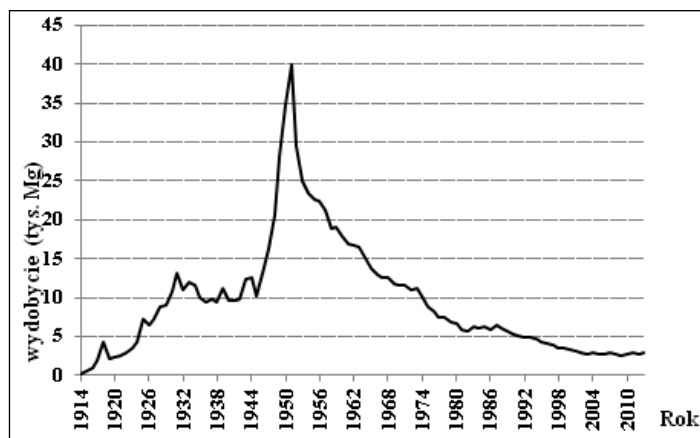
Szacowanie zasobów pierwotnych ropy dla złoża Xk zostało przeprowadzone według następujących reguł:

- ustalenie okresu i wydajności dla początkowej fazy spadku wydobywania na podstawie historii wydobywania ropy,
- wybór postaci analitycznej funkcji opisującej fazę spadku wydobywania (porównanie współczynnika korelacji liniowej lub współczynnika determinacji dla funkcji wykładniczej, harmonicznnej i hiperbolicznej),
- przyjęcie okresu prognozy wydobywania,
- obliczenie zasobów wydobywanych Q_{wp} ,
- obliczenie pierwotnych zasobów geologicznych Q_{gp} dla współczynnika szczypania zasobów $RF = 0,33$ (średnia wartość współczynnika dla złóż karpackich).

Rysunek 2 przedstawia przebieg eksploatacji ropy ze złoża Xk. Na podstawie wykresu został ustalony rok przyjęty jako początek spadkowej fazy wydobywania.

Na podstawie historii wydobywania z rysunku 2, do oszacowania funkcji opisującej fazę spadku wydobywania przyjęto okres 1952–2013. Tabela 2 przedstawia wyniki estymacji parametrów hiperbolicznej, harmonicznnej i wykładniczej funkcji spadku wydobywania dla złoża Xk – wydruki z programu statystycznego Statgraphics Plus zawierają wartości parametrów dla transformacji liniowej poszczególnych funkcji. W tabeli 2 podano również retransformacje funkcji do postaci pierwotnej.

² Autorka nie posiada upoważnienia od właściciela złoża na podanie jego pełnej nazwy.



Rys. 2. Wydobycie ropy naftowej ze złoża Xk w latach 1914–2013

Fig. 2. Extraction of oil from the deposit Xk in the years 1914–2013

TABELA 2. Estymacja parametrów hiperbolicznej, harmonicznej i wykładniczej funkcji spadku wydobycia dla złoża Xk

TABLE 2. Parameter estimation of hyperbolic, harmonic and exponential decline curves for deposits Xk

Hiperboliczna funkcja spadku wydobycia ropy: $q_t = 313 \cdot (1 + \frac{0,06}{2} \cdot t)^{-2}$				
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	0,0323682	0,00750358	4,3137	0,0001
t	0,00178069	0,000549583	3,24008	0,0020
t ²	0,0000681583	0,00000845512	8,06118	0,0000
R-squared = 97,2434 percent				
R-squared (adjusted for d.f.) = 97,15 percent				
Standard Error of Est. = 0,0190625				
Harmoniczna funkcja spadku wydobycia ropy: $q_t = 74,4 \cdot (1 + 0,45 \cdot t)^{-1}$				
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	-0,0134342	0,00704522	-1,90685	0,0613
Slope	0,00607466	0,000194466	31,2376	0,0000
Correlation Coefficient = 0,970604				
R-squared = 94,2073 percent				
R-squared (adjusted for d.f.) = 94,1108 percent				
Wykładnicza funkcja spadku wydobycia ropy: $q_t = 25 \cdot e^{-0,04 \cdot t}$				
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	3,20464	0,0272442	117,627	0,0000
Slope	-0,0395718	0,00075201	-52,6214	0,0000
Correlation Coefficient = -0,989339				
R-squared = 97,8791 percent				
R-squared (adjusted for d.f.) = 97,8438 percent				

Kryterium wyboru postaci funkcji analitycznej, opisującej przebieg eksploatacji, jest wartość współczynnika korelacji liniowej r . Dla złoża Xk największą wartość współczynnika zaobserwowano dla krzywej wykładniczej, dlatego do dalszej analizy wybrano model wykładniczy. Należy zaznaczyć, że zgodnie z regułami statystyki matematycznej każda z estymowanych funkcji spadku wydobycia może opisywać przebieg eksploatacji – zarówno współczynniki korelacji, jak i współczynniki modelu są ważne dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ (z wyjątkiem współczynnika q_0 dla funkcji harmonicznej).

Poszczególne kategorie zasobów złoża wyliczono według reguł z rozdziału 2:

- zasoby wydobywalne prognozowane, dla nieograniczonego horyzontu czasowego $Q_{wprogn} = 625$ tys. Mg (wzór 7),
- ponieważ w okresie 1952–2013 wydobyto 568,1 tys. Mg, to oznacza, że pozostało do wydobycia $Q_{prog} = 56,9$ tys. Mg (wzór 8),
- zasoby wydobywalne, pierwotne $Q_{wp} = 1091,0$ tys. Mg (wzór 9),
- pierwotne zasoby geologiczne $Q_{gp} = 3306,1$ tys. Mg (wzór 10).

3.2. Ocena dokładności szacowania zasobów złoża

Obliczenie błędów szacowania zasobów sposobem I (rozd. 2.1) opiera się na obliczeniu dolnej i górnej granicy możliwych wartości współczynnika spadku wydobycia d_w – czyli przedziału, w którym z prawdopodobieństwem 95% znajduje się rzeczywista jego wartość, a następnie dla wartości granicznych współczynnika obliczenie poszczególnych kategorii zasobów. W tabeli 3 zamieszczono wyniki obliczeń zasobów złoża oraz wartości błędów oszacowania tych zasobów.

TABELA 3. Estymacja zasobów geologicznych złoża Xk – sposób I

TABLE 3. Estimation of geological resources for the deposits Xk – way I

Współczynnik spadku wydobycia	Q_{prog} [tys. Mg]	Q_{prog} [tys. Mg]	Q_{wp} [tys. Mg]	Q_{sp} [tys. Mg]
$d_w = 0,04014$ (górną granicą przedziału ufności)	622,82	54,7	1 088,83	3 299,50
$d_w = 0,0386$ (dolną granicą przedziału ufności)	647,67	79,6	1 113,73	3 374,94
Błąd bezwzględny oceny zasobów	12,4	12,45	12,45	37,72
Błąd względny oceny zasobów	2%	2,2%	1,2%	1,1%

Ocena dokładności szacowania zasobów złoża na podstawie błędu prognozy – sposób II – wymaga ustalenia horyzontu prognozy. Dla złoża Xk okres prognozy obejmuje lata 2014–2033 (dwudziestoletni okres prognozy, $T_p = 20$). W tabeli 4 zamieszczono wyniki obliczeń zasobów geologicznych złoża oraz wartości błędów oszacowania zasobów według reguł obliczeniowych dla sposobu II (rozd. 2.1).

TABELA 4. Estymacja zasobów geologicznych złoża Xk – sposób II

TABLE 4. Estimation of geological resources for the deposits Xk – way II

	Q_{prog}	Q_{wp}	Q_{sp}
Zasoby oznaczone [tys. Mg]	28,3	1 062,4	3 219,3
Przedział ufności 95% dla zasobów [tys. Mg]	(26,9; 30,7)	(1 061,1; 1 064,8)	(3 215,5; 3 226,7)
Błąd bezwzględny dla zasobów [tys. Mg]	1,9	1,85	5,6
Błąd względny dla zasobów [%]	6,7	0,1	0,02

Porównując błędy oszacowania zasobów złoża, obliczonych według reguł sposobu I i II, można zauważyć, że największa różnica pojawia się dla zasobów pozostałych do wydobycia Q_{prog} . Wynika to z faktu, że okres prognozy obejmował tylko dwadzieścia lat, podczas gdy dla sposobu I zakładano nieograniczony horyzont prognozy ($T_p = \infty$).

Podsumowanie

Złoże, jako składnik majątku przedsiębiorstwa wydobywczego, jest aktywem, którego nie można zmierzyć jednoznacznie ani ilościowo, ani wartościowo, a właśnie ocena zasobów złoża pod względem jego zasobności decyduje o rozwoju lub przetrwaniu przedsiębiorstwa górniczego. Decyzje inwestycyjne opierają się na szacunkach ilości zasobów obiektu geologicznego. Każda procedura obliczania zasobów obciążona jest ryzykiem niedoszacowania lub przeszacowania, a więc i decyzje biznesowe muszą uwzględniać takie ryzyko. Miarą takiego ryzyka jest błąd szacowania zasobów. Uwzględnianie ryzyka w rachunku powoduje, że wielkość zasobów podawana jest nie jako jedna wartość, lecz jako przedział wartości lub jako statystyczny rozkład prawdopodobieństwa.

Dla złóż w spadkowej fazie wydobycia, szczególnie gdy brak lub są niepewne oszacowania parametrów złoża, jedną z metod szacowania zasobów możliwych do wydobycia jest metoda analityczna – ocena krzywej spadku wydajności, estymacja współczynnika spadku wydobycia, prognozowanie przyszłego wydobycia na podstawie funkcji spadku wydobycia.

Metodyka obliczania zasobów złóż ropy naftowej w fazie spadkowego wydobycia na podstawie funkcji analitycznych jest stosowana powszechnie. W dotychczasowej praktyce i w opracowaniach dokumentacyjnych starych złóż ropy naftowej brak jest spójnej, jednolitej metodyki obliczania wielkości błędów oszacowanych zasobów. Przedstawione w artykule założenia metodyczne obliczania takich błędów mogą być pomocne dla dokumentatorów złóż, jak i dla administracji geologicznej.

Literatura

- Augustyn, M. 2000. *Początki górnictwa naftowego w Bieszczadach*. Oficyna Wyd. Bieszczady.
- Barbacki, A. 1993. Geologiczne kryteria ekonomicznej oceny obszaru poszukiwań naftowych. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia* nr 3, s. 15–18.
- Byrska-Rapała, A. 2011. *Metodyka szacowania wartości godziwej złoża węglowodorów*. Kraków: Wyd. AGH.
- Byrska-Rapała, A. i Kozarkiewicz, A. 2011. *Statystyka i ekonometria*. Kraków: Wyd. AGH.
- Dudek, J. 1998. *Dokumentacja geologiczna złoża ropy naftowej („Łodyna”) – dodatek nr 2*. Arch. PGNiG SA, o. Sanok.
- Majkrzak, M. 2013. Zastosowanie analizy krzywych spadku wydobywania do oceny wielkości współczynnika szczypania złoża węglowodorów na przykładzie złoża Iwonicz-Zdrój. *Nafta-Gaz* nr 11, s. 821–828.
- Pałkowska, H. 1996. *Ocena oddziaływania na środowisko eksploatacji złoża ropy naftowej „Łodyna”*. Arch. PGNiG SA, o. Sanok.
- Petroleum Resources Management System. [Online] Dostępne w: www.spe.org/spe-site/spe/industry/reserves [Dostęp: 17.06.2014].
- Stupczyński i in. 2009 – Stupczyński, K., Semyrka, R., Marcinkowski, A., Sobolewski, J. i Szewczyk, E. 2009. Krzywe spadku wydobywania i kwantyfikacja stopnia szczypania „starych” karpaccich złóż ropy naftowej. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 2–3, s. 129–135.
- Tatara, J. 1954. *Dokumentacja geologiczna złoża ropy naftowej („Łodyna”)*. Arch. PGNiG SA, o. Sanok.
- Wiggins III, G.B. 1992. Oil and gas property evaluation [W:] *The Business of Petroleum Exploration*, Steinmetz R. (red.) *Published by American Association of Petroleum Geologists*. Tulsa, Oklahoma, s. 125–159.

