



Alicja BYRSKA-RĄPAŁA\*, Jerzy FELIKS\*\*, Marek KARKULA\*\*, Rafał WIŚNIEWSKI\*\*\*

## Optymalizacja kosztów prac wiertniczych na złożach gazu z pokładów łupków – zarys koncepcji

Streszczenie: Polska w ostatniej dekadzie stała się jednym z najbardziej aktywnych rynków poszukiwania niekonwencjonalnych złóż węgłowodorów. Obecnie na terenie kraju obowiązuje 20 koncesji na poszukiwanie i/lub rozpoznawanie złóż, w tym gazu z łupków. Powierzchnia objęta koncesjami poszukiwawczymi to 7,5% powierzchni kraju.

W cyklu życia projektu zagospodarowania i eksploatacji gazu z zasobów łupkowych można wyróżnić cztery główne etapy: wybór i przygotowanie miejsca wykonania odwiertów, etap wiercenia i szczelinowania hydraulicznego, eksploatacja (produkcja) i marketing oraz „wygaszenie” eksploatacji i rekultywacja terenu.

W artykule przedstawiono koncepcję analizy kosztów projektu inwestycyjnego związanego z poszukiwaniem i zagospodarowaniem złoża/obszaru gazu z łupków. Poddano analizie dwa pierwsze etapy dotyczące prac przygotowawczych, realizowanych na wybranym placu oraz prac wiertniczych i szczelinowania hydraulicznego.

Ze względów ekonomicznych jedynym racjonalnym sposobem udostępnienia złóż gazu łupkowego jest stosowanie otworów poziomych, wykonywanych pojedynczo lub grupowo. Ilość padów wiertniczych, pokrywających obszar koncesji jest podstawowym determinantem kosztów zagospodarowania złoża. W artykule przedstawiono wyniki analizy kosztów różnego rodzaju sposobu rozwiercania złoża o powierzchni 25 000 000 m<sup>2</sup>. Oszacowań kosztów dokonano dla dwóch wariantów: grupowego wiercenia dla trzech rodzajów padów wiertniczych – z trzema, pięcioma i siedmioma otworami oraz dla otworów wykonywanych pojedynczo. Wyniki analizy pokazują, że wraz ze wzrostem liczby odwiertów w padzie maleją sumaryczne koszty rozwiercania złoża o założonej powierzchni. Dla padów z trzema odwiertami są mniejsze w stosunku do wariantu drugiego o ponad 7%, przy pięciu są mniejsze o 11%, a przy siedmiu odwiertach realizowanych z jednego placu budowy są mniejsze w stosunku do wariantu drugiego o 11,5%. Autorzy poprzez zastosowaną metodykę wskazują kierunek oraz sposoby dalszych badań i analiz, które umożliwią optymalizację prac wiertniczych na złożach gazu z łupków.

Słowa kluczowe: gaz łupkowy, pad wiertniczy, odwiert poziomy, optymalizacja prac wiertniczych, metody sieciowe

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

\*\*\* Prof. dr hab. inż. Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków;  
e-mail: wisniows@agh.edu.pl

## Optimization of drilling costs on shale gas deposits – concept outline

**Abstract:** In the last decade, Poland has become one of the most active markets for unconventional hydrocarbon deposits exploration. At present, there are twenty concessions for the exploration and/or discovery of reserves, including shale gas. The area covered by exploration concessions constitutes ca. 7.5% of the country's area.

Four main stages can be distinguished in the shale gas development and exploitation project: the selection and preparation of the place of development of the wells, hydraulic drilling and fracturing, exploitation (production) and marketing, exploitation suppression and land reclamation.

In the paper, the concept of cost analysis of an investment project related to the exploration and development of a shale gas field/area was presented. The first two stages related to the preparatory work, carried out on the selected site, as well as drilling and hydraulic fracturing were analyzed.

For economic reasons, the only rational way to make shale gas reserves available is to use horizontal drilling, either singly or in groups. The number of drilling pads covering the concession area is a fundamental determinant of the development cost of the deposit. In the paper, the results of the cost analysis of various types of reaming method with an area of 25,000,000 m<sup>2</sup> were presented. Cost estimates were prepared for two variants: group drilling for three types of drilling pads: with three, five and seven wells and for single wells. The results show that, as the number of horizontal wells increases, the total cost of the development of the deposit is reduced. For tree-wells pad, these costs are 7% lower than in the second variant, for five-well pads they are 11% lower, and for seven-well pads they are 11.5% smaller than in the second variant. Authors, using applied methodology, indicate the direction of further research that will enable the optimization of shale gas drilling operations.

**Keywords:** shale gas, pad drilling, horizontal well, drilling optimization, network methods

## Wprowadzenie

W XX wieku przemysł naftowy stał się największym biznesem ze wszystkich funkcjonujących w gospodarce świata. Oszacowanie jego wartości jest bardzo trudne. Najbardziej ostrożne oceny mówią, że wartość rynkowa branży naftowej wzrosła w ciągu ostatnich dwóch dekad z dwóch bilionów do ponad piętnastu bilionów USD (Markus 2015).

W sytuacji wyczerpujących się złóż konwencjonalnych ropy i gazu, w ostatniej dekadzie obserwuje się duże zainteresowanie branży gazem i ropą z łupków. Wydobycie gazu łupkowego odmieniło rynek gazu w USA i Kanadzie. Amerykański sukces inspiruje obecnie do intensywnych poszukiwań niekonwencjonalnych złóż gazu ziemnego w innych krajach, w tym w krajach Europy, chociaż opłacalność takich projektów jest bardzo różna. Nawet w obrębie tego samego złoża opłacalność może się zmieniać – wewnętrzna stopa zwrotu IRR może się wahać od 1 do 48%<sup>1</sup>.

Polska stała się jednym z najbardziej aktywnych rynków poszukiwania tego typu złóż na starym kontynencie. Przy rosnącej konsumpcji gazu ziemnego, trzykrotnie większej niż produkcja z rodzimych złóż konwencjonalnych, w sytuacji, gdy poziom zasobów wydobywalnych maleje, eksploatacja gazu łupkowego daje szansę na uniezależnienie się od zewnętrznych dostaw i na kształtowanie niezależnej polityki energetycznej<sup>2</sup>. Wydobycie gazu z łupków mogłoby stymulować rozwój gospodarczy i technologiczny kraju, gdyż jest to najtańsze źródło energii. Co więcej, gaz jest najczystszy ekologicznie źródłem spośród

<sup>1</sup> Ocena Credit Suisse dla średniej ceny gazu 0,28 USD/m<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Według Polskiego Instytutu Geologicznego zasoby wydobywalne gazu konwencjonalnego zmniejszyły się z poziomu 142 mld m<sup>3</sup> w 2000 roku do 122,8 mld m<sup>3</sup> w 2015 roku (Bilans... 2016).

wszystkich paliw kopalnych, a jego eksploatacja pozwoliłaby na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

Obecnie w Polsce obowiązuje 20 koncesji na poszukiwanie i/lub rozpoznawanie złóż węglowodorów, uwzględniających gaz z łupków. Zostały udzielone siedmiu polskim i zagranicznym koncesjonariuszom. W ramach dotychczasowych prac poszukiwawczych, koncesjonariusze wykonali 72 otwory rozpoznawcze (z czego 18 to otwory poziome, a 54 – otwory pionowe). Powierzchnia objęta koncesjami poszukiwawczymi za gazem z łupków wynosi obecnie 23,5 tys. km<sup>2</sup>, co stanowi 7,5% powierzchni kraju. Tylko w części otworów wykonano zabiegi specjalne, mające na celu wstępną ocenę możliwości wydobycia gazu. Szczelinowanie hydrauliczne przeprowadzono w 26 otworach (36% wykonanych), w tym w 13 otworach poziomych<sup>3</sup>.

W artykule przedstawiono koncepcję analizy kosztów projektu inwestycyjnego, związanego z poszukiwaniem i zagospodarowaniem złoża/obszaru gazu z łupków. Przedstawiona koncepcja nie może być podstawą szerszych analiz ekonomicznych – nie uwzględnia kosztów związanych z zakupem koncesji na prowadzenie prac poszukiwawczych, kosztów poszukiwań geofizycznych w rejonie zalegania złoża, wydatków na budowę kopalni, tj. instalacji do oczyszczania kopaliny, węzła pomiarowo-sterującego, rurociągów ekspedycyjnych, węzła zasilania energetycznego itp.

Prezentowany przykład dotyczy identyfikacji i oceny nakładów inwestycyjnych rozwiercania złoża węglowodorów wierceniami pionowymi i poziomymi, autorzy poprzez zastosowaną metodykę wskazują kierunek oraz sposoby dalszych badań i analiz, które umożliwią optymalizację prac wiertniczych na złożach gazu z pokładów łupków.

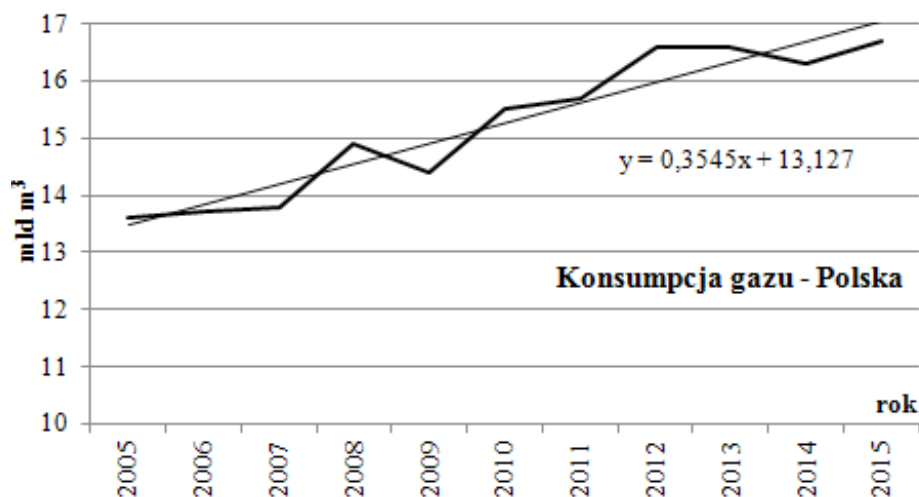
## **1. Ekonomiczny aspekt eksploatacji gazu/ropy z pokładów łupków**

Według raportu Państwowego Instytutu Geologicznego (PIG-PIB), zasoby wydobywalne gazu z łupków szacuje się od 346 do 768 mld m<sup>3</sup>. To zasoby od 2,5 do 5,5-krotnie przewyższające udokumentowane na poziomie 145 mld m<sup>3</sup> zasoby złóż konwencjonalnych gazu ziemnego (PIG 2012). Zakładając w przyszłości popyt na obecnym poziomie, tj. około 17 mld m<sup>3</sup>/rok, zasoby łączne gazu ze złóż konwencjonalnych i pokładów łupków wystarczą na 30–55 lat pełnego zapotrzebowania polskiego rynku na gaz ziemny. Obserwując trend konsumpcji gazu w Polsce – co ilustruje rysunek 1 – ze średnim przyrostem konsumpcji 0,36 mld m<sup>3</sup>/rok, jest to realna perspektywa czasowa.

Ukazało się wiele opracowań naukowych i publikacji, dotyczących analiz geologiczno-złożowych potencjału niekonwencjonalnych systemów węglowodorowych na obszarze Polski (PIG 2012; Podhalańska 2016). Niestety, niewiele jest opracowań na temat ekonomicznych aspektów produkcji gazu łupkowego. Dane pochodzące z eksploatacji, również

---

<sup>3</sup> Informacja Ministerstwa Środowiska, koncesjonariusze: Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo (PGNiG) ma 1 koncesję, Orlen Upstream – 4, Lotos Petrobaltic – 4, Baltic Oil & Gas (dawniej Talisman Energy Polska) – 2, Rawicz Energy – 1, ShaleTech Energy – 7 oraz Strzelecki Energia – 1 (<http://infołupki.pgi.gov.pl/pl/stan-prac-poszukiwawczych/aktualnosci/stan-prac-poszukiwawczych-za-gazem-z-lupkow-w-polsce-lipiec>).



Rys. 1. Konsumpcja gazu ziemnego w Polsce w latach 2005–2015

Źródło: opracowanie własne na podstawie: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>

Fig. 1. Consumption of natural gas in Poland in the years 2005–2015

z testów wydobycia gazu, nie są dostępne dla Państwowej Służby Geologicznej ani dla jednostek badawczych. To poważny mankament, uniemożliwiający ocenę ekonomicznej opłacalności eksploatacji.

W publikacjach, dotyczących ekonomiki inwestycji za gazem łupkowym autorzy odwołują się do publikacji zagranicznych. Na podstawie danych kosztowych ze złóż amerykańskich i kanadyjskich, oszacowania sumy kosztu przygotowania terenu, wiercenia otworu i szczelinowania hydraulicznego kształtują się na poziomie od 39,6 mln zł/odwiert<sup>4</sup> do 42,6 mln zł/odwiert<sup>5</sup>.

Trudno polemizować z takimi oszacowaniami, gdyż ich autorzy nie podają szczegółowych założeń takich analiz, jak np. głębokości otworów pionowych i długości wierceń poziomych, ilości otworów wierconych na założonym obszarze poszukiwań/zagospodarowania złoża. Brak również oszacowań poszczególnych pozycji kosztowych, np. rodzaju i ilości rur okładzinowych, rur wydobywczych, kosztów infrastruktury kopalni itp.

<sup>4</sup> Na podstawie danych z artykułu (Tokarz i in. 2014), po uwzględnieniu kursu dolara z 31.12.2002 r. na poziomie 3,83 zł/USD oraz średniego wskaźnika inflacji CPI dla lat 2002–2016 na poziomie 1,84%.

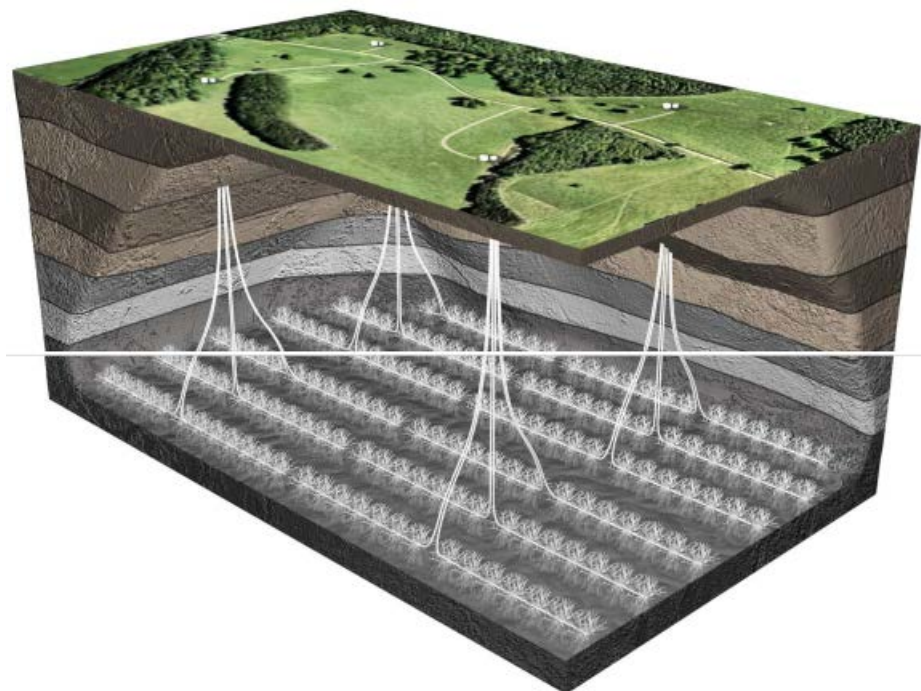
<sup>5</sup> Na podstawie danych z artykułu (Witek i Budak 2011), po uwzględnieniu średniego wskaźnika inflacji CPI dla lat 2011–2016 na poziomie 1,23%.

### 1.1. Technika zagospodarowania złoża gazu łupkowego jako determinant kosztów

Ze względu na sposób kumulacji gazu w skale macierzystej istnieją zasadnicze różnice w technice poszukiwania i udostępniania gazu konwencjonalnego i gazu łupkowego. Poszukiwanie złóż konwencjonalnych realizowane jest zasadniczo otworami pionowymi (choć możliwe jest stosowanie otworów poziomych lub wielopoziomowych). Poszukiwanie i rozwiercanie złóż gazu łupkowego może być oczywiście również realizowane otworami pionowymi, ale ze względów ekonomicznych, jedynym racjonalnym sposobem udostępnienia złoża jest stosowanie otworów poziomych. Wiercenia poziome mogą być wykonywane pojedynczo lub grupowo, tzn. z jednego placu wykonuje się kilka, a nawet kilkanaście otworów. Liczba otworów z jednego placu, nazywanego padem (ang. *pad drilling*), zależy od struktury złoża i głębokości zalegania łupków. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy układ otworów w systemie *pad drilling*, jaki może mieć zastosowanie na złożach gazu łupkowego.

Powierzchnia placu pod wiercenia grupowe, a tym samym ilość padów, pokrywających obszar koncesji na poszukiwania/zagospodarowanie złoża zależy od wielu czynników:

- Jednym z nich jest technologia wiercenia poziomego. Układ otworów w systemie *pad drilling* wyróżnia się tym, że azymut odcinka poziomego otworu musi być pro-



Rys. 2. Przykład układu otworów w systemie *pad drilling*  
Źródło: na podstawie (Wróbel i Lis 2012)

Fig. 2. Example of multi-well pad drilling

stopadły do potencjalnych szczelin, które powstaną w procesie szczelinowania skały. W procesie perforowania i szczelinowania odcinka otworu wierconego w łupkach stosuje się płyny szczelinujące o odpowiednim składzie chemicznym, a szczeliny muszą być podsadzane piaskiem o odpowiedniej granulacji. A więc na placu muszą znajdować się bezpieczne zbiorniki płynów szczelinujących i silosy na piasek.

- Zabiegi szczelinowania otworów poziomych wymagają wykonania zbiorników na zgromadzenie wody, nawet o pojemności do 70 000 m<sup>3</sup>. Taka pojemność zbiornika wymaga określonego placu poza obszarem, jaki jest niezbędny do postawienia i przesuwania urządzenia wiertniczego.
- Innym wyznacznikiem wielkości placu pod wiercenie grupowe jest ilość urządzeń technologicznych zgromadzonych jednorazowo na placu do wykonania zabiegu szczelinowania.
- Przy planowaniu powierzchni placu należy wziąć pod uwagę względy bezpieczeństwa dla swobodnego i bezkolizyjnego poruszania się jednostek transportowych oraz budowę dróg dojazdowych.

Każdy z wymienionych czynników determinuje wielkość powierzchni placu pod wiercenia czyli ilość padów, co ma istotny wpływ na poziom kosztów rozpoznania/zagospodarowania złoża.

## 1.2. Aspekt środowiskowy rozwiercania złoża w łupkach

Nie jest tajemnicą, że produkcja gazu z łupków ma bardziej niekorzystny wpływ na środowisko naturalne w porównaniu do konwencjonalnych wierceń. Do niekorzystnych czynników można zaliczyć przede wszystkim:

- zużycie znacznych ilości wody, średnio od 9000 m<sup>3</sup> do 36 000 m<sup>3</sup> na jeden odwiert,
- zanieczyszczenie wód gruntowych bezpośrednio przez szczelinowanie hydrauliczne oraz w wyniku skomplikowanych prac cementowania,
- zanieczyszczenie wód powierzchniowych i potencjalnie wody pitnej poprzez niewłaściwe unieszkodliwianie toksycznych płuczek wiertniczych zawierających sole, pierwiastki promieniotwórcze i inne toksyny,
- degradacja środowiska w wyniku budowy kopalni (drogi, zbiorniki wody, chemikalia i odpady poprodukcyjne),
- emisja gazów cieplarnianych w cyklu produkcji gazu łupkowego jest znacznie większa niż emisja przy wydobyciu konwencjonalnego gazu,
- możliwość występowania aktywności sejsmicznej związanej ze szczelinowaniem hydraulicznym.

Wymienione czynniki ryzyka nie dyskwalifikują gazu łupkowego jako surowca energetycznego. Służby geologiczne, władze lokalne regionów poszukiwania gazu łupkowego, administracja rządowa i organizacje ekologiczne są zobowiązani do monitorowania wpływu efektów poszukiwań na środowisko. Jak wynika z badań, mieszkańcy obszarów poszukiwawczych są mniej zaniepokojeni sprawami środowiskowymi i czysto technicznymi, ale chcą mieć gwarancję, że poszukiwanie i wydobycie gazu łupkowego jest bezpieczne i pod

kontrolą odpowiednich instytucji (Klawiter i in. 2013). Sytuacja energetyczna regionu i kraju nie jest obojętna ankietowanym mieszkańcom regionów poszukiwań. Aby uniknąć napięć społecznych i protestów, czyli uzyskać przyzwolenie na powstanie kopalni, konieczne jest prowadzenie dialogu z zainteresowanymi stronami. Celem komunikacji społecznej powinno być ułatwienie dostępu do informacji dla lokalnych społeczności na temat realizowanych inwestycji (Stankiewicz 2013).

Ryzyko niekorzystnych konsekwencji wpływu na środowisko, szkody geologiczne, ciągły monitoring środowiska to pozycje kosztowe w szacowaniu opłacalności projektu inwestycyjnego, jakim jest poszukiwanie/zagospodarowanie złoża.

## **2. Koncepcja zastosowania metod sieciowych do analizy czasów i kosztów operacji zagospodarowania złoża z pokładów łupków**

Poszukiwanie i zagospodarowanie złoża gazu z zasobów łupkowych jest przedsięwzięciem złożonym i często unikatowym, które może być traktowane jako projekt, czyli „unikalny proces, składający się ze zbioru skoordynowanych i kontrolowanych działań z datami rozpoczęcia i zakończenia, podejmowanych w celu osiągnięcia celu zgodnego z określonymi wymogami, uwzględniającymi ograniczenia czasu, kosztów i zasobów”<sup>6</sup>. Dla każdego projektu definiowany jest czas rozpoczęcia i oczekiwany czas zakończenia, a wszystkie działania realizowane w tym przedziale czasu muszą być planowane i skoordynowane.

Obecnie dostępnych jest wiele metodyk zarządzania projektami, a ich celem jest m.in. minimalizacja kosztów projektu, czasu jego realizacji, minimalizacja zidentyfikowanych typów ryzyka itp. Do skutecznych metod wykorzystywanych w zarządzaniu projektami można zaliczyć metody planowania sieciowego. Do podstawowych założeń metod sieciowych należy zaliczyć zasadę, według której każdy projekt można dekomponować na skończony zbiór czynności/zadań, które przedstawione są za pomocą odcinków lub/i punktów (łuków i wierzchołków), połączonych w sieć. Wśród sieci wyróżnia się sieci deterministyczne i stochastyczne. W sieciach deterministycznych zakłada się, że czasy trwania wszystkich czynności nie są zmiennymi losowymi i są ściśle określone. W przypadku sieci stochastycznych zakłada się występowanie losowości czasu trwania dla co najmniej jednej czynności.

Do najpopularniejszych i często stosowanych metod sieciowych należy metoda CPM (ang. *Critical Path Method*) i PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*).

W metodzie CPM wykorzystuje się ścieżkę krytyczną, która jest najdłuższą „drogą” łączącą zadania w danym projekcie i jednocześnie wskazuje najkrótszy czas jego realizacji. Wyznacza ona również zadania krytyczne, które niewykonane w założonym terminie, determinują całkowity czas realizacji projektu i jego koszt. Za pomocą analizy ścieżki krytycznej można również skrócić czas trwania całego projektu poprzez:

- przypisanie większej liczby zasobów (np. sprzętu, ludzi) do zadań,
- zredukowanie zakresu zadań bądź ich podział na mniejsze,
- zmianę techniki wykonywania zadań (Bozarth i Handfield 2007).

<sup>6</sup> Definicja zaczerpnięta z normy ISO 10006.

Metoda sieciowa PERT również opiera się na wyznaczaniu i analizowaniu ścieżki krytycznej, lecz umożliwia ona uwzględnienie czasu trwania poszczególnych zadań jako zmiennej losowej. Faza wstępna metody PERT polega na oszacowaniu dla każdej czynności wartości oczekiwanej i wariancji czasu trwania czynności. Czas ten określany jest na podstawie trzech parametrów:

- optymistycznego czasu trwania czynności – najkrótszy możliwy czas trwania czynności w ocenie ekspertów,
- najbardziej prawdopodobnego czasu trwania czynności – najczęściej spotykany czas trwania czynności w ocenie ekspertów,
- pesymistycznego czasu trwania czynności – czas szacowany jako najdłuższy czas trwania czynności.

Pierwszym krokiem jest sporządzenie listy czynności, które są wykonywane w ramach projektu. Przykładowy arkusz czynności (zadań) w MS Project przedstawia rysunek 3. Z poziomu tego modelu można dokonywać łączenia i/lub rozłączanie zadań, tworzenia konspektów zadań, aktualizować postęp pracy w projekcie oraz tworzyć punkty kontrolne. W przejrzysty sposób można zaprezentować początek i koniec każdego zadania lub grupy zadań.

	Tryb zadania	Nazwa zadania	Czas	Rozpoczęcie	Zakończenie	Poprzedniki
1		Projekt realizacja odwiertów	181 dn	śro, 15-07-01	śro, 16-03-09	
2		Prace przygotowawcze	53 dn	śro, 15-07-01	pią, 15-09-11	
3		Budowa drogi dojazdowej do placu wiertni	10 dn	śro, 15-07-01	wto, 15-07-14	
13		Zjazd z drogi publicznej - z płyt betonowych	2 dn	śro, 15-07-15	czw, 15-07-16	3
16		Zaplecze socjalne i parking	2 dn	śro, 15-07-15	czw, 15-07-16	13
20		Budowa placu pod wiertnię 100 x 110	40 dn	czw, 15-07-16	śro, 15-09-09	19
38		Woda, odpady, przejezdność	0 dn	śro, 15-07-01	śro, 15-07-01	
45		Wykonanie i obmurowanie bodni	2 dn	czw, 15-09-10	pią, 15-09-11	20
48		Prace wiertnicze	88 dn	pon, 15-09-14	śro, 16-01-13	2
49		Rozbiórka placu, rekultywacja terenu, wykonanie drogi dojazd	31 dn	śro, 16-01-13	czw, 16-02-25	48
64		Elementy wyposażenia placu, roboty wykończeniowe	9 dn	pią, 16-02-26	śro, 16-03-09	49

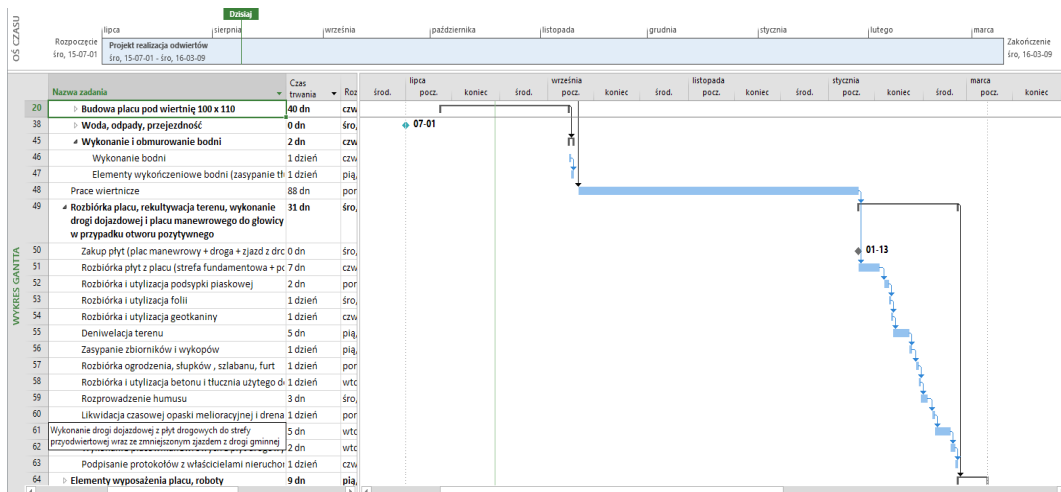
Rys. 3. Arkusz zadań dla projektu w programie Microsoft Project 2013  
Źródło: ekran programu MS projekt, opracowanie własne

Fig. 3. Worksheet for the project in Microsoft Project 2013

Bardzo wygodnym sposobem śledzenia postępów w realizacji projektu jest model w postaci wykresu Gantta, przedstawiony na rysunku 4. Wykorzystane oprogramowanie pozwala na dostosowywanie szczegółowości widoku wykresu i zwijanie lub rozwijanie jego poszczególnych składowych, co pozwala na zwiększenie czytelności z reguły rozbudowanych i złożonych diagramów.

Zaprezentowane narzędzia zarządzania projektem, czasem jego trwania, kosztami, zasobami przydzielanymi do czynności/zadań mogą być stosowane w realizacji inwestycji górniczych, w tym etapu poszukiwania i zagospodarowania złoża węglowodorów.





Rys. 4. Fragment wykresu Gantta dla projektu  
Źródło: ekran programu MS projekt, opracowanie własne

Fig. 4. A part of Gantt chart for the project

### 3. Analiza przypadku – szacowanie kosztu zagospodarowania złoża gazu z pokładów łupków

W cyklu życia projektu zagospodarowania i eksploatacji gazu z zasobów łupkowych można wyróżnić w cztery główne etapy:

- ➔ wybór i przygotowanie miejsca wykonania odwiertów,
- ➔ etap wiercenia i szczelinowania hydraulicznego,
- ➔ eksploatacja (produkcja) i marketing,
- ➔ „wygaszenie” eksploatacji i rekultywacja terenu.

Poddano analizie dwa pierwsze etapy dotyczące prac przygotowawczych, realizowanych na wybranym placu oraz prac wiertniczych i szczelinowania hydraulicznego.

Analizę obliczania kosztów zagospodarowania złoża, zilustrowano dla hipotetycznego obszaru o powierzchni 25 000 000 m<sup>2</sup>.

#### 3.1. Przygotowanie danych do analizy kosztowej zagospodarowania złoża

Wykorzystując rzeczywiste dane kosztowe dla czterech odwiertów pionowych i poziomych, które udostępniły oddziały poszukiwawcze PGNiG, z poszanowaniem interesów tych jednostek, został stworzony odwiert-benchmark. Koszt wykonania takiego „wzorca” był podstawą oszacowania kosztów zagospodarowania złoża o hipotetycznej powierzchni.

Rzeczywiste koszty budowy placu i dróg dojazdowych zostały wykorzystane do stworzenia kosztorysu budowy placu dla odwiertu „wzorca”.

Układ rodzajowy kosztów, jaki występuje w materiałach źródłowych, przygotowany jest z pozycji inwestora, tzn. że koszty są podzielone na koszty wykonawcy i koszty prac zleconych przez zamawiającego (inwestora). Dla potrzeb analizy koniecznym było stworzenie innego układu rodzajowego kosztów wiercenia otworu – tak jak w tabeli 1.

Tabela 2 przedstawia koszt wykonania odwiertu „wzorca” wraz z poszczególnymi kategoriami kosztów, natomiast w tabeli 3 przedstawiono poszczególne kategorie kosztów budowy placu i ich wartości. Pozycje kosztowe budowy placu ściśle związane są z czasem trwania zadania, gdyż wynikają z kosztów roboczegodziny maszyny/urządzenia i obsługi.

TABELA 1. Kategorie kosztów wykonania odwiertu

TABLE 1. Cost categories of well construction

<b>Mobilizacja:</b> roboty przygotowawcze, transport urządzenia, montaż urządzenia
<b>Demobilizacja:</b> demontaż urządzenia, prace końcowe, zwiezenie urządzenia na bazę lub przesunięcie
<b>Urządzenie wiertnicze:</b> faza wiercenia i prób – wiercenie, rurowanie, cementowanie, pomiary geofizyczne, testy produkcyjne; koszt dostarczenia paliwa + paliwo
<b>Opróbowanie i wyposażenie odwiertu</b>
1. Praca aparatury kontrolno - pomiarowej
2. Prace cementacyjne
3. Prace geofizyki wiertniczej
4. Prace perforacyjne
5. Prace związane z opróbowaniem otworu rurowym próbnikiem złoża
6. Prace związane z wywołaniem odwiertu/pomiary produkcji + CT + j.azot
7. Prace serwisu świrdrów wiertniczych
8. Zabiegi stymulacyjne
9. Prace serwisu kierunkowego
10. Prace związane z uzbrojeniem węglbnym + paker zabieg + skręcanie rurek
11. Serwis doszczelniania więźb i głowic (praca sprzętu, montaż)
12. Prace serwisu płuczkowego
13. Prace serwisu terenowych badań zaczynów cementowych
14. Specjalistyczne badania i prace (migracja, osad ilowy)
15. Badania serwisu rdzeniowego
16. Badania laboratoryjne rdzeni (gazy łupkowe)
17. Dozór geologiczny
18. Badania laboratoryjne
19. Nadzór wiertniczy (Drilling Supervisor)
20. Nadzór inwestorski
21. Inne prace
<b>Koszt materiałów i sprzętu</b>
1. Rury okładzinowe
2. Rury wydobywcze
3. Zestaw węglbny - łączniki
4. Więżba
5. Głowica eksploatacyjna
<b>Wydatki na infrastrukturę kopalni i odszkodowania</b>
1. Budowa drogi, ogrodzenia/roboty przygotowawcze/rekultywacja
2. Odszkodowania za drogi
3. Szkody geologiczne, ochrona środowiska (odszkodowania), monitoring środowiska
4. Koszty związane z wejściem w teren
5. Wywóz i utylizacja odpadów
6. Monitoring środowiska
7. Zaplecze socjalno-biurowe + wyżywienie
8. Dodatkowe usługi, materiały, dostawy

Źródło: opracowanie własne.

TABELA 2. Koszty wykonania odwiertu „wzorca”

TABLE 2. Cost of making a “master” well

	Głębokość [m]	2850
	Czas wiercenia [dni]	60
	Próby [dni]	28
1.	Mobilizacja [PLN]	1 003 000
2.	Demobilizacja [PLN]	476 000
3.	Urządzenie wiernicze [PLN]	5 321 837
4.	Opróbowanie i wyposażenie odwiertu [PLN]	10 736 616
5.	Koszt materiałów i sprzętu [PLN]	3 100 000
6.	Inne wydatki związane z wierceniem [PLN]	740 000
	Koszt otworu [PLN]	≈21 380 000

TABELA 3. Koszty zagospodarowania placu pod wiercenie odwiertu „wzorca”

TABLE 3. The cost of developing the square under the drill of the “master” well

	Długość drogi [m]	570
	Szerokość [m]	3,5
	Czas wykonania robót [dni]	120
1.	Droga dojazdowa do placu wiertni	193 152
2.	Zjazd z drogi publicznej - z płyt betonowych	18 113
3.	Zaplecze socjalne i parking	18 554
4.	Budowa placu pod wiertnię 100 [m] x 110[m]	533 838
5.	Zapewnienie wody technologicznej	40 320
6.	Utrzymanie przejezdności drogi dojazdowej i placu (remonty bieżące)	3 629
7.	Wykonanie i obmurowanie bodni	14 000
8.	Rozbiórka placu, rekultywacja terenu, wykonanie drogi dojazdowej i placu manewrowego do głowicy w przypadku otworu pozytywnego	28 928
9.	Elementy wyposażenia placu, roboty wykończeniowe	61 400
	Koszt infrastruktury dla odwiertu „wzorca” [PLN]	911 933

### 3.2. Analiza porównawcza kosztów dla dwóch wariantów rozwiercania złoża

Wstępna analiza kosztów wykonania odwiertów i budowy infrastruktury padu, dotyczyła dwóch możliwych wariantów takiego przedsięwzięcia:

- wariant I – zagospodarowanie złoża poprzez wykonanie sekwencyjne trzech odwiertów pionowych i poziomych z jednego placu ze wspólną infrastrukturą – pad z trzema odwiertami,
- wariant II – zagospodarowanie złoża poprzez wykonanie trzech odwiertów pionowych i poziomych, każdy wymaga osobnego przygotowania terenu i infrastruktury – trzy pady z jednym odwiertem każdy.

W tabeli 4 przedstawiono koszty wiercenia i zagospodarowania padów dla dwóch wariantów.

Wykorzystując opisane w rozdziale 3 modele sieciowe, połączono czynności przygotowania placu budowy dla wariantu I, dlatego koszt przygotowania placu budowy to

TABELA 4. Koszt inwestycji dla dwóch wariantów

TABLE 4. Cost of investment for two variants

	Wariant I	Wariant II
Koszt wykonania odwiertów [PLN]	62 335 000	64 133 000
Koszt przygotowania placu budowy [PLN]	1 046 957	2 735 799
Razem koszty [PLN]	63 381 957	66 868 799

1 046 957 PLN. Dla wariantu II, gdzie cała infrastruktura składa się z trzech osobnych odwiertów, dla których wszystkie elementy realizacji placu budowy muszą być realizowane osobno – koszt przygotowania placu to 2 735 799 PLN. Czyli koszt wariantu I jest ponad 60% mniejszy w stosunku do kosztów wariantu II.

Różnica kosztów wykonania odwiertów to 1 798 000 PLN, czyli wariant I jest tańszy około 3%. Łączne koszty różnią się o 3 486 842 PLN czyli o 5%.

Różnice kosztów powstają przede wszystkim:

- w pozycji „mobilizacja” i „demobilizacja”, gdzie różnice kosztowe będą dotyczyć przede wszystkim kosztów transportu urządzeń i sprzętu z koniecznością montażu i demontażu wiertni,
- w wariantcie I koszty serwisu rdzeniowego wystąpią tylko przy jednym odwiercie, natomiast w wariantcie II zostaną przypisane do każdego odwiertu,
- wydatki na infrastrukturę kopalni i odszkodowania w zależności od wariantu rozwiercania złoża będą różne, w wariantcie I to koszt budowy jednego placu, a w wariantcie II cała infrastruktura składa się z trzech osobnych otworów, dla których wszystkie elementy realizacji placu budowy muszą być wykonywane osobno.

Wiercenie kilku odwiertów z jednego placu pozwala na oszczędności związane z:

- dzierżawą obszaru na wiercenia,
- dojazdem do placu wiertniczego,
- wykorzystaniem urządzenia wiertniczego,
- systemem krążenia płuczki wiertniczej,
- instalacją do szczelinowania i oczyszczania płynów po szczelinowaniu,
- szybszym i tańszym połączeniem odwiertów z rurociągami zbiorczymi i przesyłowymi.

### 3.3. Założenia dla algorytmu oszacowania kosztów zagospodarowania złoża

W algorytmie obliczeniowym zostały uwzględnione dwa warianty (jak w rozdziale 3.1), z tym że wariant I uwzględnia trzy różne pady:

- wariant I: odwierty realizowane z jednego placu budowy, z opcjami:
  - dla trzech odwiertów pionowych i poziomych,
  - dla pięciu odwiertów pionowych i poziomych,
  - dla siedmiu odwiertów pionowych i poziomych,
- wariant II: pojedyncze odwierty, z których każdy wymaga osobnego przygotowania terenu i placu budowy.

Determinantem kosztów jest powierzchnia potencjalnego obszaru poszukiwawczego  $P$  oraz wielkość „powierzchni eksploatacyjnej”, zależnej od długości wiercenia poziomego.

Przyjęty wariant rozwiercania złoża, powierzchnia obszaru poszukiwawczego i długości wiercenia poziomego są podstawą obliczania liczby padów eksploatacyjnych.

W algorytmie obliczeniowym, dla ustalenia ilości padów, przyjęto następujące założenia:

- powierzchnia obszaru  $P = 25\,000\,000\text{ m}^2$ ;
- dla wariantu I:
  - odległość między odwiertami pionowymi – 20 m,
  - szerokość pasa penetracji łupków od odwiertu poziomego – 200 m,
- dla wariantu II:
  - odległość między odwiertami pionowymi – 100 m.

Konsekwencją takich założeń jest fakt, że obszar „penetracji”, czyli szerokość pasa postawiania szczelin w górotworze złoża, jest następujący:

- dla wariantu I:
  - szerokość pasa penetracji łupków od odwiertów poziomych – 600 m,
  - szerokość pasa penetracji łupków od odwiertów poziomych – 1000 m,
  - szerokość pasa penetracji łupków od odwiertów poziomych – 1400 m,
- dla wariantu II: szerokość pasa penetracji łupków od odwiertu poziomego – 200 m.

Wielkość „powierzchni eksploatacyjnej” zależy od długości wiercenia poziomego. Algorytm obliczeniowy uwzględnia trzy scenariusze: 1000, 1500 i 2000 m.

Uwzględniając potencjalną powierzchnię obszaru eksploatacji oraz szerokości pasów penetracji łupków w tym obszarze, ilości padów dla wariantów I i II przedstawia tabela 5.

TABELA 5. Ilość padów dla każdej opcji wiercenia poziomego

TABLE 5. Number of pads for each horizontal drilling option

Długość odwiertu poziomego [m]	1 000	1500	2000
	Liczba padów (P powierzchnia eksploatacyjna)		
Wariant Ia	42	28	21
Wariant Ib	25	17	13
Wariant Ic	18	12	9
Wariant II	125	84	63

Program obliczeniowy zbudowano w formie arkusza, który pozwala na dokonywanie różnego rodzaju zmian, czyli tworzenie różnych scenariuszy prowadzenia prac przy rozwiercaniu złoża. Możliwa jest modyfikacja kosztów jednostkowych poszczególnych etapów prowadzenia prac wiertniczych, jak i modyfikacja ilości odwiertów przewidzianych do realizacji w wariantach pierwszym (trzy opcje). Wyniki obliczeń pozwalają na porównanie kosztów realizacji prac dla wariantu I oraz II.

Jako przykład w tabeli 7 przedstawiono wyniki obliczeń kosztów zagospodarowania złoża dla wariantu Ia, Ib, Ic i wariantu II. Obliczenia wykonano dla scenariusza wykonania pojedynczego odwiertu, zamieszczonego w metryce (tab. 6).

TABELA 6. Scenariusz wykonania odwiertu

TABLE 6. Scenario of well construction

	Jednostka	Wartość
<b>Dane o odwiercie</b>		
Długość wiercenia pionowego	m	2 850
Długość wiercenia poziomego	m	1 000
Szerokość pasa penetracji łupków od odwiertu poziomego	m	200
Czas wiercenia – liczba dni	doba	60
Czas prób – liczba dni	doba	28
Powierzchnia złoża	m <sup>2</sup>	25 000 000

TABELA 7. Koszt zagospodarowania złoża dla różnych wariantów padów wiertniczych

TABLE 7. Development cost of deposits for various variants of drilling pads

Pozycje kosztowe [mln PLN]	Wariant Ia	Wariant Ib	Wariant Ic	Wariant II
Koszt wykonania jednego padu wiertniczego	55,82	91,57	126,95	19,69
Liczba padów	42	25	18	125
<b>Koszt całkowity prac wiertniczych na złożu</b>	<b>2 344,44</b>	<b>2 289,25</b>	<b>2 285,10</b>	<b>2 461,25</b>
Koszt infrastruktury	43,97	30,32	24,85	114,00
<b>Koszt całkowity</b>	<b>2 388,41</b>	<b>2 319,57</b>	<b>2 309,95</b>	<b>2 575,25</b>

Interesujące jest porównanie kosztów całkowitych rozwiercania złoża. Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 7 – przyjmując wariant II jako wariant podstawowy – można stwierdzić, że poszczególne opcje wariantu I pozwalają uzyskać oszczędności w sposobie organizacji prac wiertniczych od 7,8%, przy wykonywaniu trzech odwiertów poziomych ze wspólnego placu budowy, do 11,5% dla siedmiu odcinków poziomych. W prezentowanych w tabeli 7 wyliczeniach założono długość odcinka poziomego równą 1000 m.

### Podsumowanie

Autorzy, poprzez zastosowaną metodykę, wskazują kierunek oraz sposoby dalszych badań i analiz, które umożliwią optymalizację prac wiertniczych na złożach gazu z łupków.

Prezentowany arkusz programu Excel ma za zadanie wspomaganie podjęcia decyzji o sposobie prowadzenia wierceń za ropą naftową i gazem z pokładów łupków. W arkuszu zaimplementowano pewne stałe schematy – sposoby prowadzenia prac. Przyjęto dwa warianty, z których jeden zakłada realizację określonej liczby odwiertów z jednego placu budowy, drugi zakłada realizację jednego odwiertu z jednego placu budowy. Przy odwiertach realizowanych z jednego placu budowy, w celu porównania kosztów prowadzenia prac wiertniczych założono, że realizowane będą trzy lub pięć lub siedem odcinków poziomych. Wyniki analiz pokazują, że wraz ze wzrostem liczby odwiertów w padzie maleją sumaryczne

koszty rozwiercania złoża o założonej powierzchni. Dla padów z trzema odwiertami są mniejsze w stosunku do wariantu drugiego o ponad 7%, przy pięciu są mniejsze o 11%, a przy siedmiu odwiertach realizowanych z jednego placu budowy są mniejsze w stosunku do wariantu drugiego o 11,5%. Z wykorzystaniem programu można przeprowadzić innego typu analizy. Jedną z nich jest analiza wpływu długości odcinka odwiertu poziomego na koszty rozwiercania złoża. Jej wyniki wskazują, że w miarę wydłużania poziomego odcinka maleją koszty rozwiercania złoża o założonej powierzchni.

Wyniki te należy traktować jako pewnego rodzaju drogowskaz wskazujący kierunek dalszych badań identyfikacji i oceny nakładów inwestycyjnych dla rozwiercania złoża węglowodorów wierceniami pionowymi i poziomym. Aby przeprowadzić wiarygodne analizy porównawcze należy opracować model wyznaczania kosztów prowadzenia prac wiertniczych odcinka poziomego w zależności od jego długości. W przedstawionej pracy założono model liniowy, co zdaniem autorów jest zbyt dużym uproszczeniem rzeczywistych kosztów prowadzenia wierceń poziomych.

## Literatura

- Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce, wg stanu na 31 XII 2015 r.*, PIG, Warszawa 2016. [Online] Dostępne w: <https://www.pgi.gov.pl/geologiczne-bazy-danych.html> [Dostęp: 10.07.2016].
- Bozarth, C. i Handfield, R.B. 2007. *Wprowadzenie do zarządzania operacjami i łańcuchem dostaw*. Gliwice: Wyd. Helion.
- Budak, P. i Witek, W. 2011. Gaz łupkowy (Shale Gas) – strategia dla Polski do 2025 r. *Nauka i Technika* 7(159). [Online] Dostępne w: <http://studiiopinii.pl/wp-content/uploads/2013/12/gaz2025.pdf> [Dostęp: 16.07.2017].
- Klawiter i in. 2013 – Klawiter, M.M., Borek, G., Pasternak, P. i Mielniczuk, A. 2013. Działania samorządów województw: pomorskiego, kujawsko-pomorskiego, warmińsko-mazurskiego i lubelskiego, związane z poszukiwaniem i rozpoznaniem niekonwencjonalnych złóż węglowodorów. *Przegląd Geologiczny* t. 61, nr 6, s. 338–342.
- Markus, U. 2015. *Oil & Gas: The Business and Politics of Energy*. Palgrave Macmillan, New York.
- Państwowy Instytut Geologiczny 2012. *Ocena Zasobów Wydobywalnych Gazu Ziarnego i Ropy Naftowej w Formacjach Łupkowych Dolnego Paleozoiku w Polsce (Basen Bałtycko-Podlasko-Lubelski), Raport Pierwszy*. [Online] Dostępne w: [http://www.pgi.gov.pl/pl/component/docman/doc\\_download/771-raport-pl.html](http://www.pgi.gov.pl/pl/component/docman/doc_download/771-raport-pl.html) [Dostęp: 20.07.2016].
- Podhalańska, T. 2016. Blok artykułów – niekonwencjonalne systemy węglowodorowe basenów bałtycko-podlasko-lubelskiego oraz karbońskiego SW Polski. *Przegląd Geologiczny* t. 64, nr 12, s. 951–952.
- Stankiewicz, P. 2013. Razem o łupkach: czyli jak prowadzić dialog publiczny przy poszukiwaniu i wydobywaniu gazu z łupków. *Przegląd Geologiczny* t. 61, nr 6, s. 374–380.
- Tokarz A i in. 2014 – Tokarz, A., Burchart-Korol, D. i Nowak, D. 2014. Wybrane aspekty środowiskowe, ekonomiczne i społeczne produkcji gazu łupkowego – przegląd literatury. *Przegląd Górniczy* t. 70, nr 10, s. 137–146.
- Witek, W. i Budak, P. 2011. Gaz łupkowy (Shale Gas) – strategia dla Polski do 2025 r. *Wiadomości* 7(159), s. 4–11.
- Wróbel, G. i Lis, P. 2012. Gdzie uwięziony jest gaz łupkowy i czy łatwo go wydobyć. X Międzynarodowe Targi i Konferencja GEOLOGIA „GEO – ECO – TECH”, Państwowy Instytut Geologiczny–Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, 24 maja 2012 r. [Online] Dostępne w: <https://www.pgi.gov.pl/docman-tree/aktualnosci-2012/targi-geologia/976-gdzie-uwieziony-jest-gaz-lupkowy-i-czy-latwo-go-wydobyc/file.html> [Dostęp: 16.07.2017].
- [Online] Dostępne w: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf> [Dostęp: 23.07.2017].

